

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Industriel : Conception et Production**

Arrêté ministériel : 07-08-2006

Présentée par

Benjamin Vayre

Thèse dirigée par **François Villeneuve**
et codirigée par **Frédéric Vignat**

préparée au sein du laboratoire **G-SCOP**
et de l'école doctorale **I-MEP2**

Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM

Thèse soutenue publiquement le **01-07-2014**,
devant le jury composé de :

M, Alain Bernard

Professeur des Universités, École Centrale de Nantes, Président

M. Philippe Bertrand

Maître de Conférences, HDR, École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne,
Rapporteur

M. Pascal Mognol

Professeur des Universités, École Normale Supérieure de Rennes, Rapporteur

M. Stéphane Abed

Docteur, Gérant de la société Poly-Shape, Examinateur

M. François Villeneuve

Professeur des Universités, Université Joseph Fourier, Directeur de thèse

M. Frédéric Vignat

Maître de Conférences, École de Génie Industriel Grenoble INP, Co-Directeur de
thèse



C'est toujours les mêmes qu'on cite, pas étonnant qu'ils soient connus.

Michel Audiard

Remerciements

L'aventure que représente un travail de thèse amène à rencontrer un grand nombre de personnes. Je souhaite remercier particulièrement certaines de ces personnes pour leur impact sur ma thèse. En premier lieu, je tiens à remercier tout particulièrement François Villeneuve et Frédéric Vignat pour leur encadrement. Je les remercie de m'avoir guidé et d'avoir su me mettre la pression quand cela a été nécessaire. La découverte de la fabrication additive a été extrêmement intéressante, je suis content d'avoir partagé le début de l'aventure scientifique de l'EBM en France avec vous.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail de thèse. Je remercie tout particulièrement Pascal Mognol et Philippe Bertrand pour avoir accepté de rapporter ce mémoire et pour leurs retours constructifs. Merci beaucoup à Alain Bernard et à Stéphane Abed, deux personnalités importantes dans le domaine de la fabrication additive, d'avoir présidé mon jury pour Alain et examiné mon travail pour Stéphane.

Ces travaux de thèse ont été réalisés au laboratoire G-SCOP, au sein du pôle de Conception Intégrée, dans l'équipe Conception Produit Process. Je remercie l'ensemble des membres du laboratoire pour les conseils qui m'ont été apportés, ainsi que pour les agréables moments. Je pense en particulier à Guy Prudhomme que je souhaite tout particulièrement remercier pour nos échanges sur la conception et les nombreuses choses qu'il m'a permis de comprendre. Un merci tout particulier également pour Matthieu Museau avec qui j'ai pu avoir des échanges à la fois techniques, scientifiques et musicaux (mais rarement de manière simultanée). Merci également à Philippe Marin pour son travail sur le décapsuleur "EBM", devenu l'emblème français informel de cette technologie ! Merci à Kheira Tourki et Souad Boudjit, mes voisines ces trois dernières années qui me manqueront. Merci également à Marie-Jo Corminier et à Fadila Messaoud pour leurs coups de main pendant la thèse ainsi que pour sa concrétisation.

J'aimerais également adresser un grand merci à la "team EBM" grenobloise composée de Frédéric Vignat, François Villeneuve, Rémy Dendievel, Jean-Jacques Blandin, Guilhem Martin, Mathieu Suard, Nicolas Béraud et les autres. Je suis privilégié d'avoir participé à la naissance d'une équipe inter-laboratoires sur une thématique aussi intéressante. Merci également aux membres de la plate-forme GI-NOVA, dans laquelle se trouve la machine, avec lesquels j'ai passé de très bons moments : Alain Di Donato, Jean Francois Genestier, Pierre Marie Boitel, Thierry Henocque et Christofer Carballo Garcia.

Si l'ambiance du laboratoire est aussi bonne et si j'ai pu m'épanouir dans cet environnement, c'est grâce aux doctorants formidables que j'y ai rencontré et avec lesquels j'ai partagé tant de choses. Je salue les grelous du laboratoire, et tout particulièrement Bertrand le Canadien, Gabriel le Norvégien et Geoffrey l'Allemand avec lesquels j'ai arpenté les massifs du Vercors, de Belledonne et de la Chartreuse. Merci à Lucie, Ingwild,

Lucile et Chloé pour les super soirées passées ensemble et pour m'avoir supporté lors de la dernière année, d'ici quelques mois nous formerons une belle ribambelle de docteurs ! Merci à Bertrand le Parisien de Briançon, Ariel, Boris, Clément, Yacine, Natalia, Hugo, Anne-Laure, Nicolas et les autres pour les soirées et les parties de cartes. Je vous souhaite le meilleur pour la suite !

Lors de la rédaction de ce manuscrit et de la préparation de la soutenance, j'ai pu m'appuyer sur mes parents Bertrand et Chantal, mon frère Lucas ainsi que sur mes grands parents Jean, Maryse et Nanou. Merci pour votre soutien et pour votre aide lors de la relecture.

Enfin, pour m'avoir supporté cette dernière année de thèse, m'avoir aidé pour la relecture et pour le pot, ainsi que pour tout le reste, un merci magique pour toi Ingwild.

Table des matières

Table des matières	5
Glossaire	9
Introduction	13
1 Étude bibliographique	21
1.1 Introduction	22
1.2 Technologies de fabrication additive	22
1.2.1 Historique	22
1.2.2 Classification	23
1.2.3 Fabrication additive par couches	24
1.2.4 Fabrication additive par dépôt direct	26
1.3 Les procédés métalliques	27
1.3.1 Poudres métalliques	27
1.3.2 Les différentes technologies	28
1.3.3 Caractéristiques des moyens de fabrication additive	30
1.4 Les procédés additifs dans l'industrie	33
1.5 Démarches de conception et procédés de fabrication additive	34
1.5.1 Processus de conception intégrée	35
1.5.2 Caractérisation des procédés	36
1.5.3 Optimisation de formes des pièces réalisées par fabrication additive	36
1.5.4 Méthodes DFAM existantes	39
1.6 Conclusion de l'étude bibliographique	40
2 Faut-il concevoir pour la fabrication additive en couches ?	43
2.1 Introduction	44
2.2 Domaine de conception pour les principaux procédés conventionnels	44
2.2.1 Usinage	44
2.2.2 Fonderie	46
2.2.3 Forgeage	47
2.2.4 Conclusion	48
2.3 Évolution du domaine des possibles en conception de produits fabriqués par procédés additifs métalliques	48
2.3.1 Accessibilité de l'intégralité du volume de fabrication	48
2.3.2 Fabricabilité au sein du volume de fabrication	51
2.3.3 Récupération de la poudre non liée	54

2.3.4	Qualité surfacique et dimensionnelle	55
2.3.5	Matériaux disponibles	56
2.4	Conclusion	57
3	Facteurs influençant la conception des produits fabriqués par EBM	59
3.1	Introduction	60
3.2	Le procédé EBM	60
3.3	Détermination expérimentale des facteurs qui influent sur la conception des produits fabriqués par la technologie EBM	62
3.3.1	Identification des facteurs influents	62
3.3.2	Caractéristiques de la machine	63
3.3.3	Dépoudrage	64
3.3.4	Problématique thermique	71
3.3.5	Qualité des pièces	79
3.4	Durée de fabrication et coût des pièces fabriquées par EBM	83
3.4.1	Durée de fabrication	83
3.4.2	Coût de revient des pièces	90
3.5	Conclusion	92
4	Démarche de conception de produits fabriqués par EBM	95
4.1	Introduction	96
4.2	Contexte	96
4.2.1	Domaine d'étude	96
4.2.2	Cahier des charges de la méthodologie de conception	97
4.3	Démarche de conception proposée	97
4.3.1	Analyse des spécifications	99
4.3.2	Génération de formes initiales	100
4.3.3	Choix du balancement des pièces	102
4.3.4	Raffinement de la géométrie	104
4.3.5	Validation de la pièce	106
4.4	Cas d'étude : équerre aéronautique	107
4.4.1	Pièce étudiée	107
4.4.2	Analyse du cahier des charges fonctionnel	108
4.4.3	Génération de formes initiales	109
4.4.4	Choix du balancement des pièces	112
4.4.5	Raffinement de la géométrie	113
4.4.6	Obtention de la géométrie finale et validation	114
4.5	Critiques	117
4.6	Conclusion	118
5	Perspectives	119
5.1	Introduction	120
5.2	Opérations de finition et gamme de fabrication	120
5.2.1	Finition par usinage	120
5.2.2	Traitements thermiques	120
5.2.3	Autres procédés de finition	121

5.3	Approfondissement de la démarche de conception pour l'EBM	121
5.3.1	Fabricabilité et simulation numérique	121
5.3.2	Supports	122
5.3.3	Impact des paramètres de fabrication sur la conception	122
5.3.4	Prise en compte des treillis dans la conception	123
5.4	Généralisation de la démarche de conception	123
5.4.1	Application aux autres technologies additives métalliques	124
5.4.2	Application à la conception de mécanismes et de pièces déformables	124
5.5	Impacts environnementaux	125
5.6	Conclusion	126
Conclusion		127
Bibliographie		131
A Communications scientifiques		139
B Calcul du coût de revient d'une pièce mécanique		149
B.1	Coût de revient technique pour les procédés traditionnels	149
B.2	Application au procédé EBM	150
C Cas d'étude : décapsuleur		153
C.1	Pièce étudiée	153
C.2	Analyse du cahier des charges fonctionnel	153
C.3	Génération des formes initiales	154
C.4	Balancage des pièces et volume fabricable	155
C.5	Raffinement de la géométrie	157
C.6	Obtention de la géométrie finale et validation	158

Glossaire

ALM *Additive Layer Manufacturing* : fabrication additive par couches, principe de fabrication de la plupart des procédés additifs (LBM, EBM, SLS, etc).

AM *Additive Manufacturing* : fabrication additive, obtention de pièces par ajouts successifs de matière.

Axes de la machine La machine EBM possède trois axes : l'axe Z est l'axe vertical ou axe de fabrication, l'axe X est l'axe de déplacement du rateau et l'axe Y est perpendiculaire à X et Z (Figure 1).

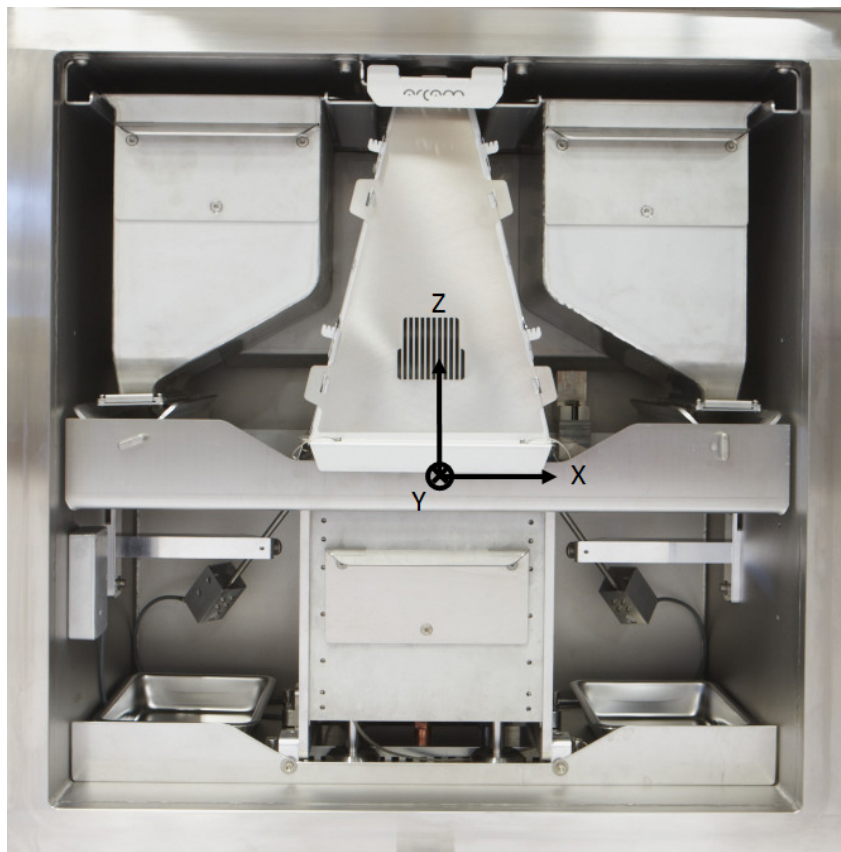


FIGURE 1 – Axes de la machine EBM

CAO Conception Assistée par Ordinateur : outils d'aide à la conception numériques. Ils permettent de concevoir la géométrie, de réaliser des assemblages, d'effectuer des simulations numériques, etc. Par extension, on qualifie parfois les modèles tridimensionnels numériques obtenus à l'aide de ces outils de "modèles CAO".

CN Commande Numérique : système numérique qui pilote une machine de fabrication. Le terme de CN est souvent utilisé comme diminutif de MOCN pour Machine Outil à Commande Numérique.

DFM et DFAM *Design for Manufacturing* et *Design for Additive Manufacturing* : méthodes de conception qui prennent en compte, à la fois les exigences du cahier des charges fonctionnel, et celles du procédé. Le DFAM concerne spécifiquement la prise en compte des exigences des procédés de fabrication additive.

DMD et CLAD *Direct Metal Deposition* et Conception Laser Additive Directe : procédé de fabrication additive métallique par projection de particules de poudre en fusion.

DMLS *Direct Metal Laser Sintering* : procédé de fabrication additive métallique par couches qui lie les particules par fusion partielle à l'aide d'une source Laser.

EBM *Electron Beam Melting* : procédé de fabrication additive métallique par couches qui lie les particules par fusion à l'aide d'un faisceau d'électrons.

EBF3 *Electron Beam Freeform Fabrication* : procédé de fabrication additive métallique par dépôt d'un fil fondu à l'aide d'un faisceau d'électrons.

FAO Fabrication Assistée par Ordinateur : outils numériques d'aide à la préparation de la fabrication numériques, ils permettent de générer les programmes qui décrivent les trajectoires pour les commandes numériques des machines de production. Ils permettent, en outre, d'effectuer des simulations de la fabrication.

FDM *Fused Deposition Modeling* : procédé de fabrication additive par dépôt d'un fil fondu, généralement un plastique PLA ou ABS, à l'aide d'une résistance électrique.

LBM *Laser Beam Melting* : procédé de fabrication additive métallique par couches qui lie les particules par fusion à l'aide d'une source Laser, anciennement appelé SLM pour *Selective Laser Melting*.

LOM *Laminated Object Manufacturing* : procédé de fabrication additive par superposition et collage de couches, généralement de papier ou de bois, usinées ou découpées.

PRS *Powder Recovery System* : système de dépoudrage et récupération de la poudre consolidée basé sur une machine de sablage (utilisant la même poudre que celle employée pour la fabrication).

RM *Rapid Manufacturing* : production de pièces par fabrication additive. Nom donné par analogie au prototypage rapide.

RP *Rapid Prototyping* : prototypage rapide, utilisation historique des procédés additifs, appellation parfois encore utilisée pour désigner les procédés additifs.

RT *Rapid Tooling* : fabrication d'outillage par fabrication additive.

SL Stéréolithographie : procédé de fabrication additive par couches à partir d'un bain de résine photo-sensible et d'une source Laser.

SLS *Selective Laser Sintering* : procédé de fabrication additive par couches qui lie les particules par consolidation locale de polymères, ou d'autres matériaux enrobés d'un liant polymère.

Surfaces négatives Surfaces dont la normale extérieure matière est orientée vers le bas de la machine (en Z-, Figure 2).

Surfaces positives Surfaces dont la normale extérieure matière est orientée vers le haut de la machine (en Z+, Figure 2).

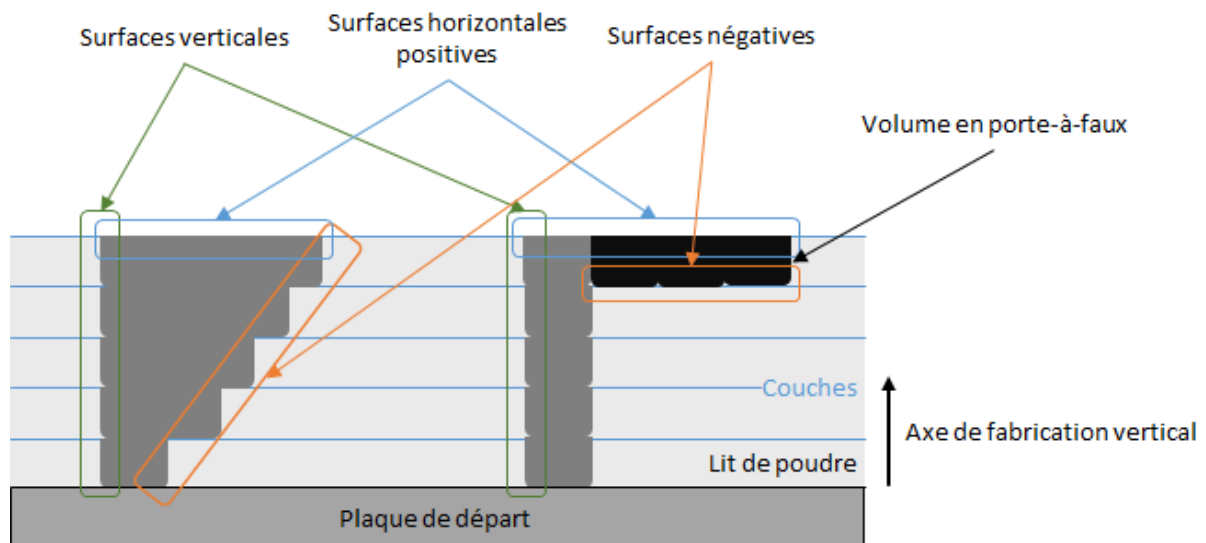


FIGURE 2 – Surfaces positives, négatives et volumes en porte-à-faux

Volumes en porte-à-faux Volumes limités par des surfaces négatives (Figure 2).

Introduction

Les procédés de fabrication additive ont régulièrement été au cœur de l'actualité ces dernières années. L'apparition d'"imprimantes 3D" à des tarifs inférieurs au millier d'euros permet de toucher un large public technophile. Ainsi les fab-lab, lieux ouverts à tous généralement dotés de moyens de fabrication conventionnels et additifs, se multiplient [POL⁺10]. Cette dynamique a conduit certains chercheurs à théoriser la troisième révolution industrielle : la personnalisation de masse (*mass customization*, Figure 3). La personnalisation de masse consiste à produire massivement des produits personnalisés, par opposition à la production de masse de produits standardisés.

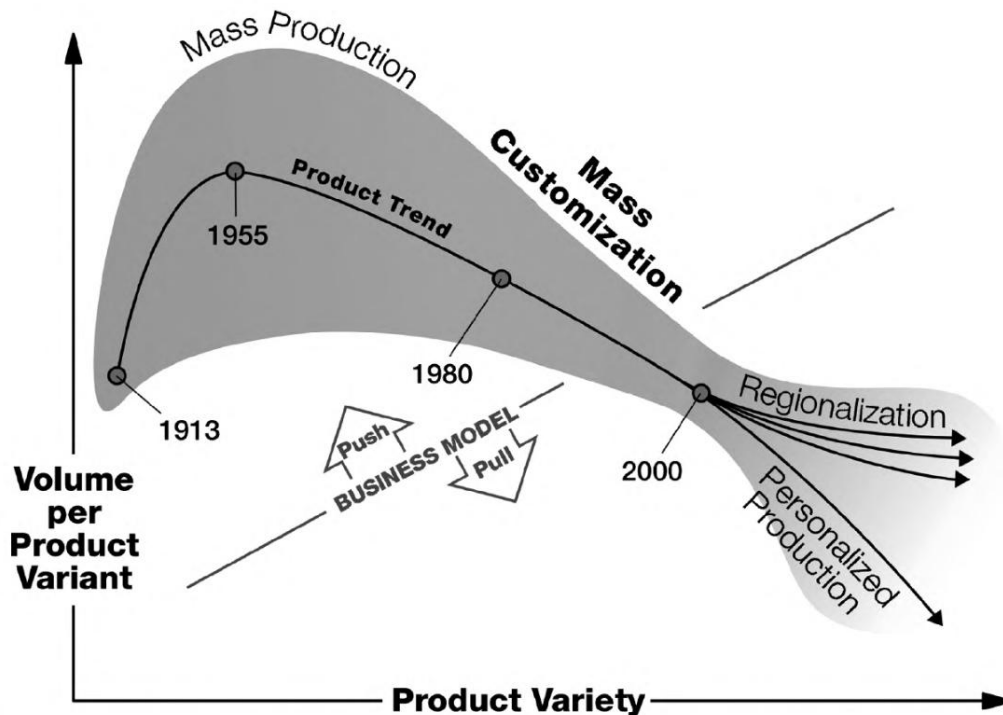


FIGURE 3 – Evolution du paradigme de production, de la production artisanale à la production personnalisée [Kor10]

Maturité des procédés additifs

Les industriels utilisent des machines de fabrication additive depuis les années 1980 avec le développement de la stéréolithographie. Contrairement au grand public, pour lequel les utilisations se situent en haut de la courbe des espérances, l'industrie est en train d'adopter ces moyens à des fins de production (Figure 4, d'après [FR08]). L'apparition de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés permet aujourd'hui la réalisation de pièces conformes aux spécifications du cahier des charges, du point de vue des spécifications géométriques, et également des spécifications du comportement des pièces. Ces procédés, autrefois cantonnés au seul domaine du prototypage rapide, sont devenus des moyens de production [HHD05].

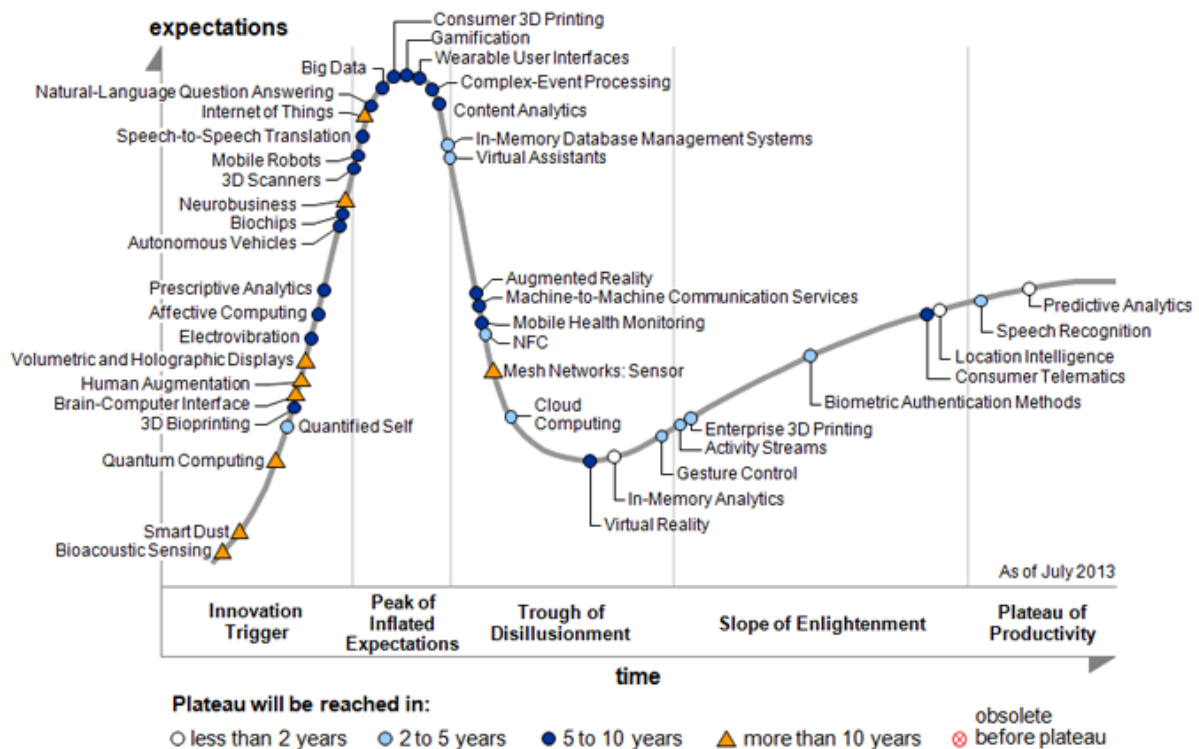


FIGURE 4 – Courbe des attentes et espérances des technologies innovantes en 2013 réalisée par le cabinet Gartner [Gar13]

Le secteur de la fabrication additive est en pleine croissance et génère un chiffre d'affaires de plus d'un milliard de dollars pour les fabricants de machines et les sociétés de services en fabrication additive [Woh11]. Ces moyens sont toujours majoritairement utilisés par les industriels à des fins de prototypage rapide (58%). Le deuxième domaine d'application concerne la réalisation d'outillage rapide (*Rapid Tooling*). Le troisième domaine d'application (16%) de ces technologies est la production industrielle de pièces [Woh11].

Les pièces réalisées à l'aide des moyens additifs sont aujourd'hui majoritairement des pièces à forte valeur ajoutée. Les secteurs industriels principalement concernés sont le monde médical, l'aéronautique et l'aérospatial. Aujourd'hui, des pièces réalisées par fabrication additive ont été implantées sur des patients [Fre14], volent dans des avions [Nou14] et orbitent autour de la terre¹. Nous voyons donc que ces moyens de fabrication commencent à être matures et qu'ils ont déjà pénétré certains secteurs industriels.

1. Pièce de structure présentée par Thales Alenia à l'occasion de l'animation Fabrication Additive organisée par le CNES à Toulouse les 18 et 19 novembre 2013.

Pertinence industrielle de la fabrication additive par couches

Les procédés de fabrication additive sont trop peu utilisés pour produire des pièces industriellement. Ce phénomène peut s'expliquer par leur utilisation historique pour le prototypage rapide, toujours d'actualité, par les temps de fabrication élevés des moyens dédiés à la production et par la méconnaissance de ces procédés. La rupture qu'ils représentent par rapport aux procédés conventionnels dans leur principe même, et dans les compétences que nécessite leur utilisation sont également des freins à leur adoption. Certains industriels ont ainsi peur d'investir dans une bulle technologique sans lendemain. C'est pour cela qu'il nous paraît intéressant de montrer la pertinence des moyens de fabrication additive actuels dans un contexte industriel. Nous allons ainsi comparer deux processus d'obtention d'une pièce existante, l'un conventionnel et l'autre combinant la fabrication additive, pour l'obtention de la pièce demi-finie, et l'usinage pour la finition. Le moyen de fabrication additive envisagé est une machine de fabrication par fusion à l'aide d'un faisceau d'électrons (*Electron Beam Melting* - EBM), modèle "Q20".

Présentation de la pièce La pièce qui nous intéresse est une turbine aéronautique réalisée en alliage de Titane (Figure 5). Elle fait partie du compresseur axial d'une turbine à gaz (Figure 6). Lors du fonctionnement de la turbine, cette pièce se trouve au contact d'un flux d'air à haute vitesse. L'état de surface des pales étant déterminant pour le rendement du système, les tolérances sur l'état de surface des aubes sont très serrées ($Ra\ 2\ \mu m$). La pièce est composée d'un moyeu de 80 mm de diamètre et de treize pales dont le diamètre extérieur mesure 130 mm. Son volume est de $54\ cm^3$ et sa masse est d'environ 240 g. Nous avons émis des hypothèses pour estimer les coûts d'utilisation des différentes machines à partir de notre parc machines. Les coûts d'achat des matières premières sont ceux pratiqués par le fabricant de la machine EBM et une estimation basée sur des prix actuels pour le brut d'usinage.

Réalisation par usinage La pièce est actuellement réalisée par usinage, sur un centre d'usinage 5 axes, à partir d'un brut cylindrique de diamètre 132 mm et de 32 mm de haut, dont la masse est de 2 kg. La faible épaisseur des aubes et le bon état de surface spécifié ont conduit au choix d'une gamme de fabrication composée d'une phase d'usinage comprenant : une opération d'ébauche, une opération de demi-finition et une opération de finition. La faible distance entre les pales est contraignante par rapport à l'accessibilité des volumes à usiner et impose l'utilisation d'une fraise de faible diamètre (fraise hémisphérique carbure de 6 mm de diamètre). Les alliages de Titane s'usinant difficilement, la vitesse de coupe est faible (50 m/min), notamment pour limiter l'échauffement de l'arête de coupe. Les conditions de coupe des trois opérations sont décrites dans le tableau suivant (les opérations de demi-finition et de finition étant réalisées par usinage en flanc) :

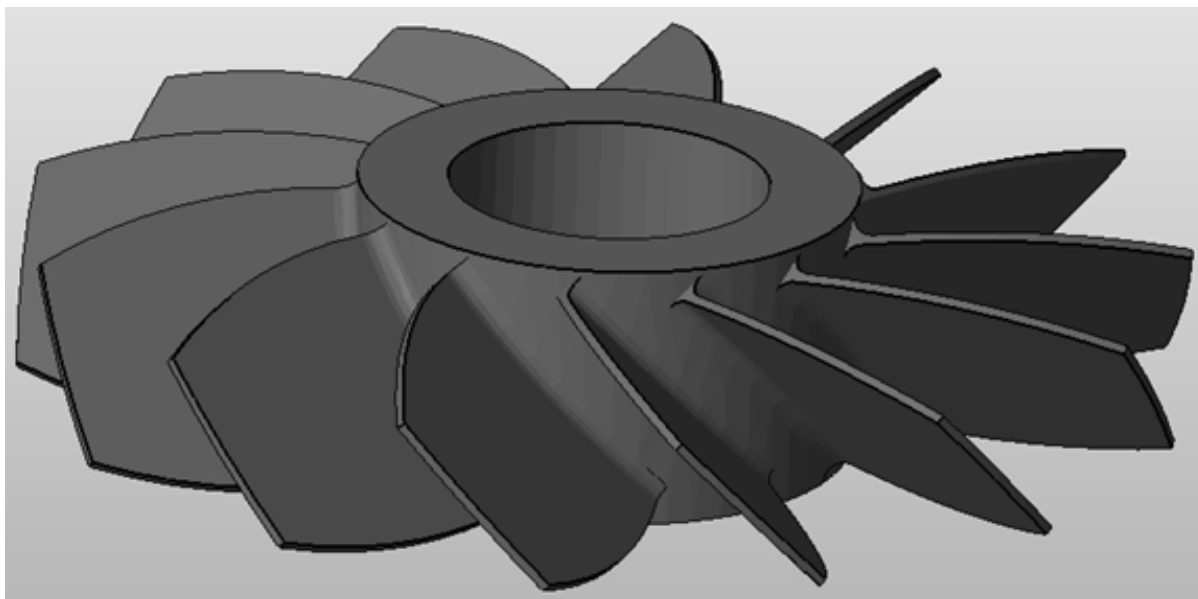


FIGURE 5 – Vue CAO de la pièce finie

Opération	A_p^a	A_e^b	Avance par dent
Ebauche	2 mm	3,5 mm	0,006 mm/dent
1/2 Finition	3,5 mm	0,1 mm	0,2 mm/dent
Finition	3,5 mm	0,1 mm	0,3 mm/dent ^c

^a. Engagement axial de l'outil

^b. Engagement radial de l'outil

^c. La surépaisseur constante permet d'augmenter l'avance par dent par rapport à l'opération de demi-finition.

L'opération d'ébauche dure 1h40, celle de demi-finition 3h08 et la finition 2h05. L'outil de faibles dimensions et la vitesse de coupe peu élevée rendent la consommation électrique de la broche négligeable, par rapport à la consommation totale de la machine qui est d'environ 4 kWh pour le centre utilisé. La phase d'usinage de la pièce dure environ 6h50 et consomme 27 kWh. 380 cm³ de matière première sont enlevés du brut pour réaliser la pièce qui représente 13% du volume initial. Le prix de fabrication de la pièce est d'environ 2 kg * 50 à 100 €/kg + 6,83 h * 100 à 200 €/h \approx 780 à 1600 €.

Processus de fabrication hybride Le procédé de fabrication EBM ne permet pas d'obtenir directement les états de surface spécifiés, il permet cependant d'obtenir une pièce demi-finie (avec des surépaisseurs d'usinage de 0,2 mm pour l'opération de finition ultérieure). La pièce est donc réalisée par un processus de fabrication hybride qui comporte une phase d'obtention de la pièce demi-finie par EBM, puis une phase de finition par usinage pour obtenir la pièce finie. La pièce est produite à l'aide d'une machine de grandes dimensions qui dispose d'un volume de fabrication de 350 mm de diamètre par 380 mm de hauteur. L'axe de la pièce fabriquée est orienté suivant l'axe vertical de la machine ; de ce fait, il est possible de réaliser cinq pièces simultanément. En superposant ces pièces selon

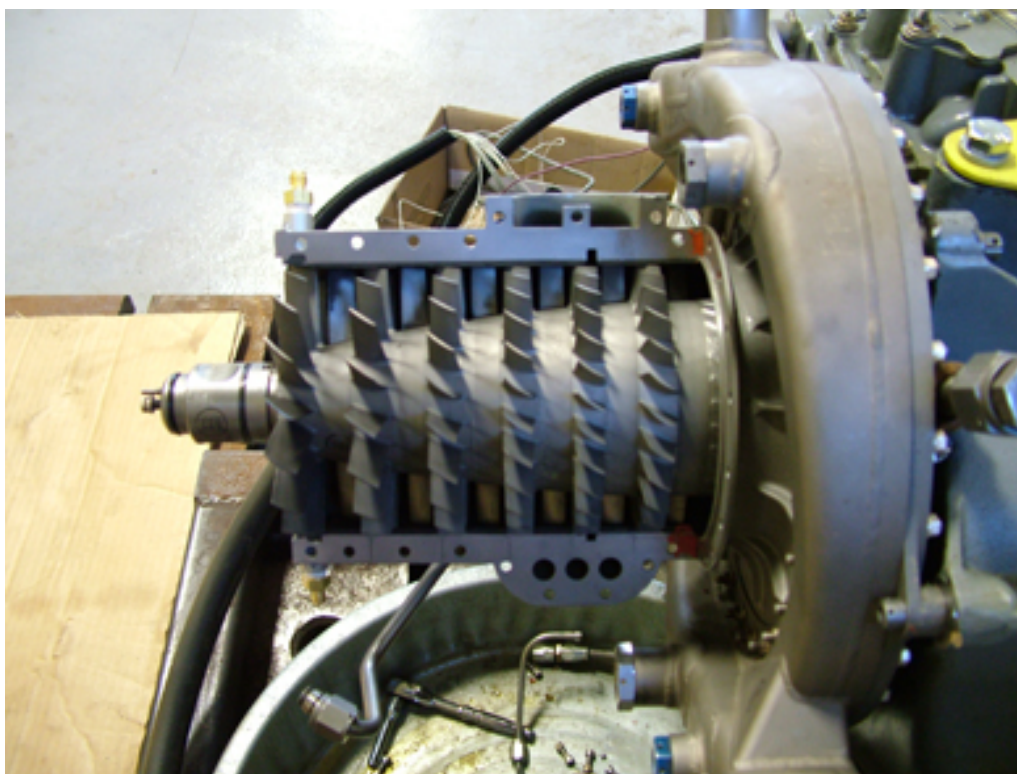


FIGURE 6 – Compresseur axial d’une turbine à gaz similaire à celle dans laquelle notre pièce est utilisée [mé11]

l’axe vertical, des lots de cinquante pièces peuvent être produits à chaque utilisation de la machine. Avec les paramètres de fabrication du constructeur, la fabrication des aubes de la turbine nécessite la présence de nombreux supports (Figure 7).

La fabrication des cinq pièces dure environ 13h30 (dont 4h30 de mise sous vide, montée en température et refroidissement des pièces dans la machine pour 9h de fabrication) et consomme 73 kWh. Chaque pièce demi-finie nécessite 440 g de matière première (en tenant compte des supports). En prenant en compte la phase de finition par usinage, la durée de fabrication de chaque pièce est de 2h42 sur le procédé EBM, à laquelle il faut ajouter les 2h05 de finition : on obtient donc une durée totale de 4h47 avec une consommation d’énergie de 23 kWh pour chaque pièce. Le prix d’une pièce est d’environ $0,44 \text{ kg} * 200 \text{ €/kg} + (2,7 \text{ h} * 200 \text{ à } 300 \text{ €/h} + 2,08 \text{ h} * 100 \text{ à } 200 \text{ €/h}) \approx 840 \text{ à } 1300 \text{ €}$.

Synthèse du cas d’étude La comparaison des deux processus de fabrication est détaillée dans le tableau suivant :

Processus	Durée	Coût	Énergie	Matériau
Usinage	6h50	780 à 1600 €	27 kWh	2 kg
EBM puis usinage	4h47	840 à 1300 €	23 kWh	0,44 kg

Cette comparaison est réalisée à géométrie et à qualité de pièces identiques, puisque la phase de finition est la même. La fabrication de la pièce par le processus hybride offre une

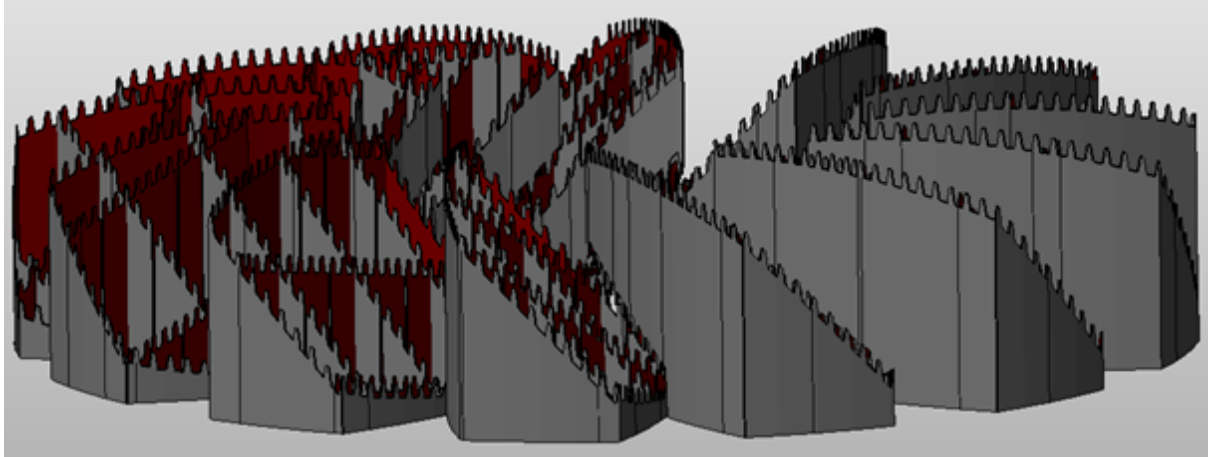


FIGURE 7 – Supports utilisés pour réaliser la pièce demi-finie avec les paramètres de fabrication constructeurs

durée de fabrication, une consommation d'énergie et une quantité de matière première réduites respectivement de 30%, 14% et 76%. Le prix de revient de la pièce dépend des coûts d'achat de la matière première ainsi que des coûts d'utilisation des machines. Les deux fourchettes de prix, obtenues avec nos hypothèses, sont similaires et ne montrent pas de gains ou de pertes significatifs.

L'utilisation d'un moyen de fabrication additive dans ce contexte permet de réduire la consommation d'énergie, la quantité de matière première consommée et la durée d'obtention des pièces. Cet exemple montre qu'il existe des situations de production pour lesquelles les procédés de fabrication additive peuvent s'avérer concurrentiels par rapport aux procédés conventionnels sans modification de la pièce. Des cas d'études de reconception puis de fabrication par des moyens additifs ont montré des gains importants en termes de performances, notamment en concevant des pièces non fabricables, ou très complexes et donc conduisant à des temps de fabrication importants avec les procédés conventionnels [CSKG12]. Il est donc intéressant d'étudier la conception de produits en relation avec la fabrication additive, pour améliorer les aspects positifs mis en valeur ici.

Domaine des possibles en conception de produits

Le domaine des possibles en conception de produits désigne le domaine dans lequel le concepteur peut concevoir une pièce fabricable. Une pièce fabricable par un processus de production respecte les contraintes de fabrication des procédés, qui interviennent dans le processus de fabrication et les exigences, exprimées dans le cahier des charges. Les contraintes de fabrication sont liées à un procédé particulier, elles décrivent les limites de ce qu'il est possible de fabriquer avec ce procédé. Ces contraintes sont liées à des caractéristiques géométriques et des propriétés de comportement (type de matériaux, propriétés mécaniques). Elles permettent d'établir des règles de conception.

Le domaine des possibles en conception est souvent décrit par la somme de ses limites édictées sous forme de contraintes de fabrication. Avec les procédés additifs, les contraintes de fabrication changent fortement par rapport aux procédés conventionnels.

La fabrication d'entités géométriques, qui n'existaient auparavant que dans l'esprit des concepteurs, devient possible. Il est important de prendre également en compte les nouvelles possibilités qui peuvent faire évoluer les exigences et permettre de trouver une solution optimale pour la conception de produits. Notre approche pour expliciter le domaine des possibles s'appuiera donc sur la définition des limites. Elle illustrera également les nouvelles possibilités pour conclure sur le besoin d'une démarche de conception spécifique.

Questions de recherche

Le but du présent travail de recherche est de déterminer ce que les procédés de fabrication par couches apportent comme changement dans le domaine de la conception de produits. Cette question est un préliminaire pour déterminer s'il est nécessaire d'adopter une démarche de conception spécifique, afin d'exploiter convenablement ces procédés et la forme que cette démarche doit avoir.

Pour répondre à ces questions, nous nous intéresserons tout d'abord à l'état de l'art des travaux sur les procédés additifs et sur la conception de pièces réalisées avec ces procédés. Dans un second temps, nous nous focaliserons sur l'*Electron Beam Melting*, un type de procédé de fabrication additive métallique dont nous analyserons les spécificités. Nous expliciterons les différents facteurs qui influent sur la fabrication et qui impactent la conception. Nous proposerons ensuite une démarche de conception qui permet de prendre en compte ces facteurs pour concevoir des pièces tirant parti des bénéfices de ces procédés, tout en intégrant les contraintes que nous aurons identifiées. Enfin, nous discuterons des perspectives de ce travail, définies lors de la thèse, et des axes de recherche qu'il nous semble intéressant de poursuivre.

Chapitre 1

Étude bibliographique

1.1 Introduction

Les procédés de fabrication additive sont de plus en plus présents dans la société. Si le grand public les connaît sous la forme d'imprimantes 3D à vocation principalement ludique et récréative, les mondes industriel et scientifique les côtoient depuis près de trente ans, pour leur usage comme moyen de prototypage rapide. Au cours des dernières décennies, les développements de ces moyens et l'apparition de nouvelles technologies ont permis leur essor au sein du monde industriel. Cet essor suscite de nombreuses interrogations à long terme, notamment celle de l'évolution de la fabrication industrielle de masse vers une production plus décentralisée et plus personnalisée [FdSB12]. Il met également en lumière des problématiques très actuelles, que ce soit celle des performances des procédés, de leur impact énergétique et environnemental ou celle de leur bonne utilisation par les concepteurs. Ces questions sont particulièrement importantes pour les procédés qui permettent de réaliser des pièces en alliages métalliques, eu égard aux fortes attentes des secteurs médicaux, aéronautiques et automobiles.

L'étude bibliographique réalisée dans le cadre du travail de thèse établira tout d'abord un état de l'art des différentes technologies de fabrication additive. Dans un deuxième temps, nous nous focaliserons sur les procédés additifs métalliques. Nous verrons ensuite quelles sont les applications industrielles actuelles et quelles méthodes de conception sont utilisées pour tirer parti de ces technologies. Nous conclurons, enfin, par les réponses que la littérature apporte à la prise en compte des spécificités de ces procédés et au besoin d'une démarche de conception spécifique.

1.2 Technologies de fabrication additive

1.2.1 Historique

La fabrication additive consiste à réaliser des pièces par ajouts successifs de matière à partir d'un support, d'un substrat ou ex-nihilo sans l'utilisation d'un outillage spécifique. Les premiers procédés utilisant ce principe sont apparus à la fin des années 1980 [VVV12b] (papier en Annexe A). Il s'agit de la stéréolithographie (SL), du dépôt de fil fondu (Fused Deposited Manufacturing - FDM) et de la fabrication à partir d'objets laminés (Laminated Object Manufacturing - LOM). Au vu de leurs caractéristiques mécaniques inférieures à celles des pièces obtenues par les procédés conventionnels [GRS10], ces procédés étaient utilisés à des fins de prototypage rapide, généralement pour offrir un aperçu de la géométrie finale du produit (prototypes "bonne forme"). Dans la période 1990 - 2000, de nombreux autres procédés utilisant des types de mécanisme de liaison différents ont également été adoptés comme moyens de prototypage rapide. En termes de variété de matériaux utilisables, initialement limités à des plastiques ABS, du bois et du carton, le choix s'est diversifié avec l'arrivée de nouveaux procédés et l'amélioration des procédés existants. Il est aujourd'hui possible d'utiliser certains de ces moyens pour fabriquer des pièces métalliques conformes aux spécifications du concepteur, tant pour la géométrie des pièces que pour la nature et les propriétés des matériaux utilisés. Le prototypage rapide (*Rapid Prototyping* - RP) a ainsi donné naissance à la production de pièces par fabrication additive (*Rapid Manufacturing* - RM) [HHD05].

1.2.2 Classification

Les procédés de fabrication additive sont très nombreux et nous n'en avons jusqu'ici évoqué qu'une partie. En effet, il existe de nombreuses technologies différentes et de nombreuses dénominations constructeur. Les procédés peuvent être classés suivant la nature des matériaux utilisés : plastique, alliage métallique, polymère ou composite [LSK03], ou suivant l'état sous lequel se présente le matériau initial : liquide, solide en feuilles ou solide sous forme de particules [PG98] (Figure 1.1).

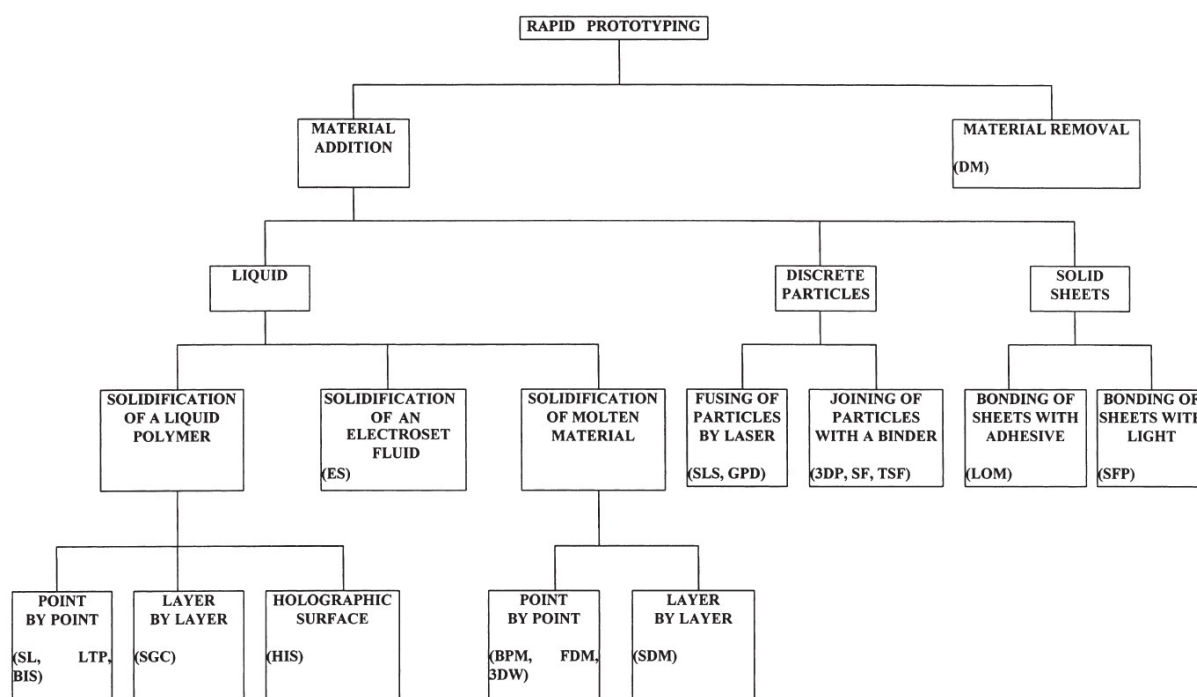


FIGURE 1.1 – Classification des procédés suivant l'état du matériau initial proposée par Pham et al. [PG98]

Cette classification permet d'associer les moyens de fabrication aux principes de fonctionnement qu'ils mettent en jeu. Les procédés basés sur l'utilisation de matériaux liquides permettent la fabrication de pièces en photo-polymères avec une polymérisation déclenchée par un rayonnement Laser, ultraviolet ou infrarouge (Stéréolithographie - SL ou Polyjet par exemple). Ceux employant des matériaux solides massifs sont essentiellement utilisés à des fins de prototypage car les matériaux employés sont soit du papier (procédé *Laminated Object Manufacturing* - LOM), soit des polymères, soit du bois (Stratoconception). Les matières premières peuvent également être solides sous forme de fil puis fondues pour être déposées sous forme pâteuse (procédé *Fused Deposition Modeling* - FDM). Le procédé de fabrication libre par faisceau d'électrons (procédé *Electron Beam FreeForm Fabrication* - EBF3) permet la réalisation de pièces métalliques avec ce principe. Il s'apparente aux procédés de soudage TIG ou MIG et est cantonné aujourd'hui à la réalisation de bruts d'usinage. Enfin, l'utilisation de poudres permet de fabriquer des pièces métalliques, plastiques ou céramiques par couches ou de manière directe.

Pour tous ces derniers procédés, deux principes technologiques sont mis en œuvre : la

fabrication en couches (*Additive Layer Manufacturing* - ALM) et la fabrication par dépôt direct (procédé *Direct Metal Deposition* - DMD). L'utilisation d'un principe ou de l'autre a une grande incidence sur le type de formes réalisables ainsi que sur les contraintes de fabrication.

1.2.3 Fabrication additive par couches

Principe La majorité des procédés additifs fonctionne selon le principe de fabrication par couches. Ce principe consiste à découper le modèle volumique de la pièce en tranches parallèles de 20 à 150 μm d'épaisseur (Figure 1.2), puis à réaliser ces différentes couches les unes au-dessus des autres dans un lit de matière non liée. Une fois la fabrication terminée, la matière non liée est enlevée pour être réutilisée et la pièce est récupérée.

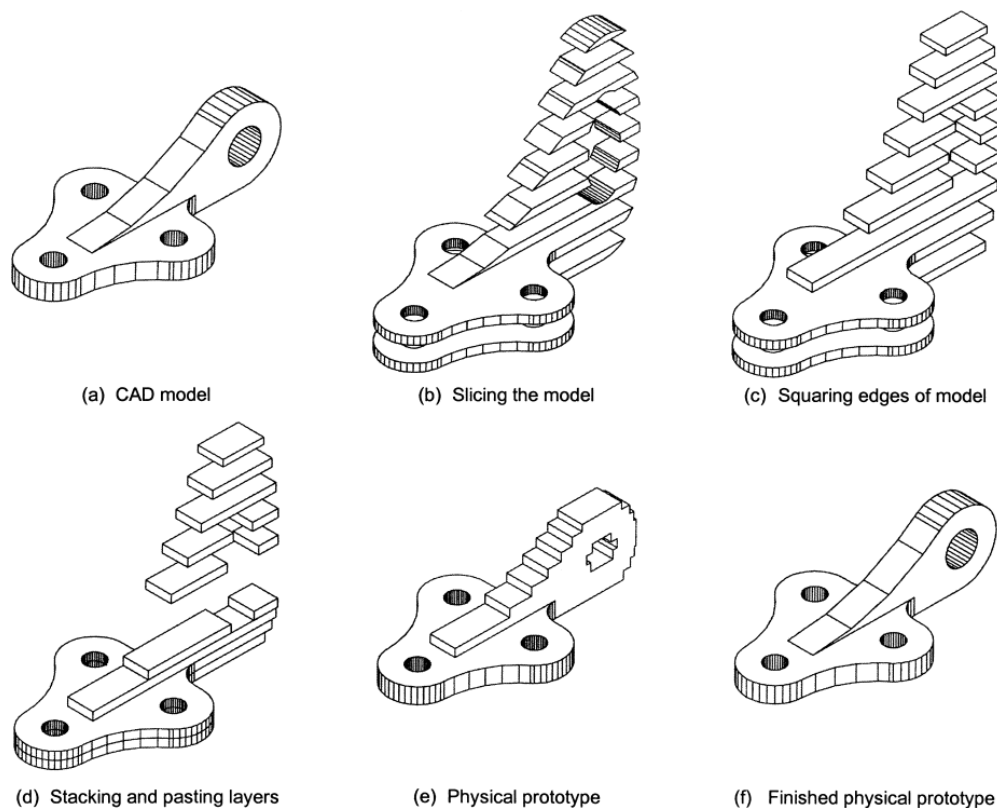


FIGURE 1.2 – Réalisation d'une pièce (a) en couches : découpe du modèle CAO en tranches (b)(c) qui seront réalisées successivement (d) jusqu'à l'obtention de la pièce (e) éventuellement parachevée (f) [KSJ⁺00]

La figure 1.3 illustre les trois étapes principales pour un procédé utilisant des matériaux sous forme de poudre et une source Laser. Dans un premier temps, on forme une couche de matériau non lié (lit de poudre avec un racleur ou épaisseur de thermoplastique par exemple) de l'épaisseur d'un incrément. Dans un deuxième temps, la matière est liée de manière sélective afin de fabriquer une section de la pièce. Cette liaison des particules peut être réalisée par l'action d'un liant apporté par la buse, par la fusion d'un

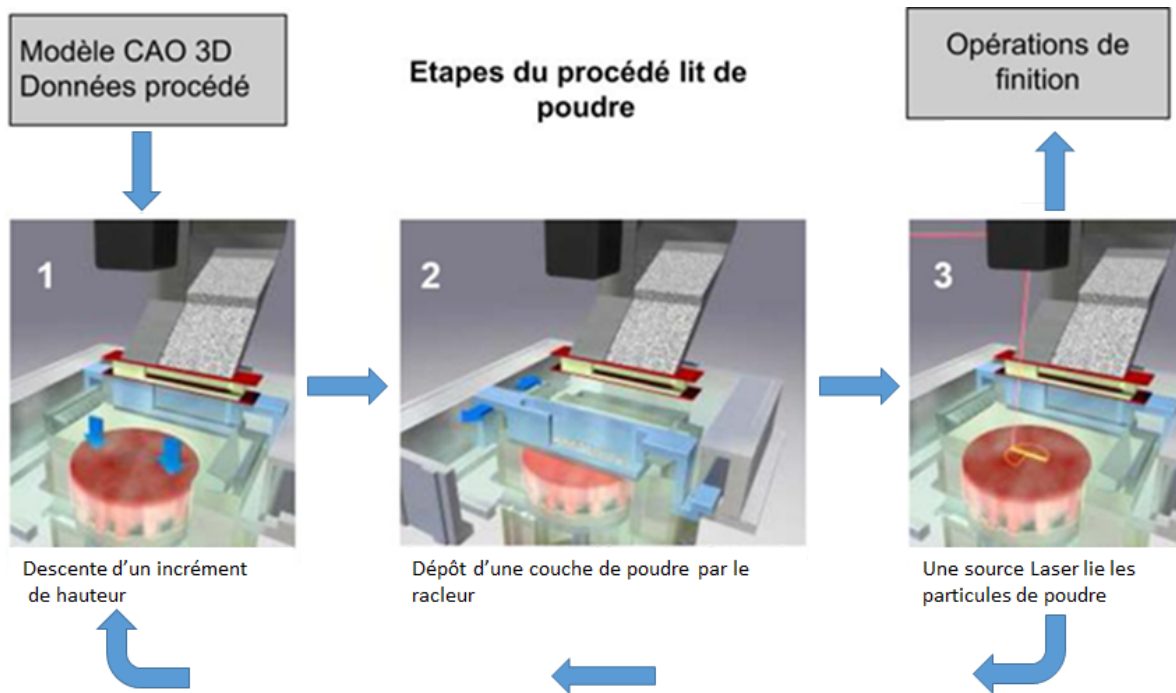


FIGURE 1.3 – Principe de fabrication en couches avec un procédé Laser [VVV12b]

enrobage ou par la fusion partielle ou totale des particules de poudre. Une fois la couche complètement fabriquée, la pièce est abaissée d'un incrément en hauteur et le processus est répété jusqu'à l'obtention de la pièce.

Matériaux De nombreux types de matériaux peuvent être utilisés en suivant ce principe. Des photopolymères thermodurcissables liquides sont polymérisés par un faisceau Laser (procédé SL) ou par un projecteur d'ultraviolets équipé d'un masque. Les thermostoplastiques sous forme de poudre sont fondus par faisceau Laser (procédé *Selective Laser Sintering* - SLS). Les poudres à base de plâtre peuvent être liées par des résines déposées par des têtes d'impression afin de réaliser des composites (machines Zcorp). Les composites, et notamment le bois, le papier et le carton, sont usinés en couches puis assemblés à l'aide de pions et de colle (stratoconception). Il est possible d'employer des poudres de n'importe quelle nature avec certains procédés qui utilisent un liant pour les particules de poudres. Ce liant est soit directement déposé par une buse (procédé ZCorp), soit présent sous forme d'enrobage (procédé SLS). Il pourra être ultérieurement enlevé pour infiltrer un autre matériau comme matrice du composite. Les matériaux métalliques peuvent être liés par un liant (procédé SLS), par fusion partielle (procédé *Direct Metal Laser Sintering* - DMLS) ou par fusion totale afin d'obtenir des pièces denses (procédés *Laser Beam Melting* - LBM, EBM et DMD).

Spécificités de la fabrication en couches La grande force des procédés additifs par couches repose sur la brièveté du temps de préparation de la fabrication et sur la possibilité de réutiliser la matière non liée. La courte durée du temps de préparation est due à la génération de trajectoires simples, car en deux dimensions. La matière non

liée n'est pas polluée pendant la fabrication, donc réutilisable. En contrepartie, il est coûteux d'augmenter la taille du volume de fabrication en raison de la quantité de matière mobilisée qui croît au cube de la dimension. Le temps de fabrication est, en outre, majoré à cause de la phase de dépôt du lit de poudre. Pour certaines sources d'énergie comme le Laser ou le faisceau d'électrons, l'augmentation de la taille du lit de poudre peut se traduire par des déformations optiques de la zone de fusion. Enfin, certains procédés et notamment les procédés métalliques, nécessitent la réalisation de supports afin de fabriquer certaines géométries.

1.2.4 Fabrication additive par dépôt direct

Principe Le second principe de fabrication qui peut être utilisé en fabrication additive est le dépôt direct de matière (Figure 1.4). Il est notamment utilisé par les machines de dépôt de fil fondu (procédé FDM). Ces procédés de fabrication permettent la réalisation de pièces en thermoplastique (polyamide, polycarbonate, polyéthylène, polypropylène) ; ils se démocratisent actuellement et pénètrent le marché des particuliers en raison de leur faible prix. D'autres procédés projettent des photopolymères dont la polymérisation est ensuite obtenue par l'action d'une lumière UV (procédé Polyjet). Ce principe est également employé pour réaliser des pièces métalliques par projection de particules métalliques en fusion (procédé DMD).

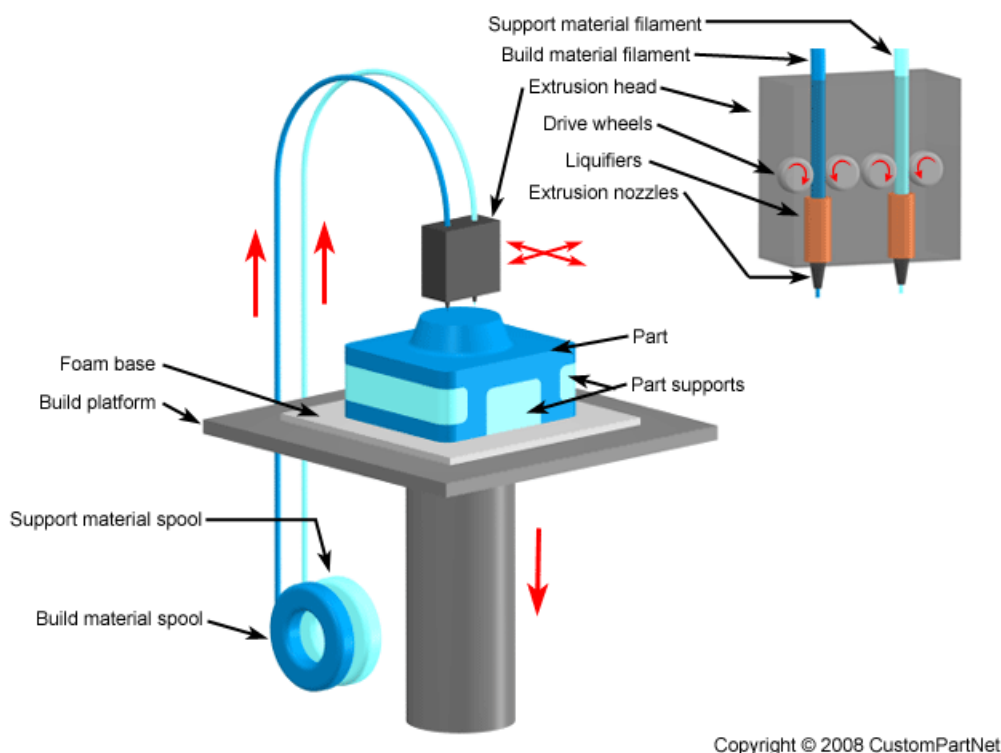


FIGURE 1.4 – Principe de fabrication directe avec un procédé FDM bi-buse

Spécificités de la fabrication par dépôt direct Le matériau est apporté directement au niveau de la buse, il est donc possible d'utiliser plusieurs buses (ou plusieurs outils) afin, soit d'accélérer la vitesse de fabrication, soit de réaliser des pièces en multi-matériaux. Il est en outre possible d'effectuer des opérations d'ajout et d'enlèvement de matière sur la même machine, en ajoutant une broche d'usinage. Une cinématique de machine adéquate permet de fabriquer une pièce à partir d'un "substrat" non plan, afin d'effectuer un rechargement de matière, par exemple. L'utilisation de structures classiques de machine outil permet la réalisation de machines de grandes dimensions (buse placée sous un portique par exemple [Pre14]). L'utilisation d'une structure de machine à cinématique complexe impose cependant les mêmes contraintes qu'en usinage, c'est-à-dire une phase de génération des trajectoires qui s'avère plus délicate que pour les procédés par couches. La buse peut également entrer en collision avec la pièce ou des éléments du posage.

1.3 Les procédés métalliques

Les procédés de fabrication additive qui permettent de réaliser des pièces métalliques utilisent des poudres d'alliages ou du fil comme matière première. Les procédés à base de fil (EBF3) ont un usage aujourd'hui limité au rechargement de pièces et à la réalisation de bruts d'usinage car ils nécessitent des opérations d'usinage pour toutes les surfaces des pièces réalisées [TH03]. Nous nous focaliserons sur les procédés qui mettent en jeu des particules de poudre. Ces procédés diffèrent principalement par le mécanisme de liaison des particules, la source d'énergie utilisée et le type de fabrication : par couches ou directe.

1.3.1 Poudres métalliques

Matériaux disponibles Il est aujourd'hui possible de fabriquer des pièces dites "bonne matière", c'est-à-dire dans le matériau souhaité et avec des propriétés mécaniques nominales [KFR⁺03]. La liste d'alliages métalliques disponibles ne cesse d'augmenter d'année en année. Les pièces peuvent être réalisées en Aciers (inoxydable ou non), en Titane (alliages et Titane commercialement pur), en Aluminium (alliages de moulage), en alliages à base Nickel (Inconels), en alliages Cobalt-Chrome ainsi qu'en métaux précieux comme l'Argent ou l'Or. Tous les procédés ne permettent cependant pas d'utiliser l'ensemble de ces matériaux. Une liste procédé par procédé, établie lors de ce travail de thèse, est disponible dans l'annexe A.

Obtention des poudres Les poudres sont obtenues par atomisation au gaz [Sak13]. Un alliage métallique à l'état liquide est pulvérisé par un flux de fluide (généralement de l'argon) puis la granulométrie est contrôlée pour éliminer les particules trop fines ou trop grosses. Ce procédé permet l'obtention de particules de poudre quasi-sphériques dont la taille est généralement comprise entre 20 et 150 μm . Les granulométries varient suivant les procédés. L'utilisation de poudres de faible granulométrie permet d'améliorer l'état de surface [SHL11]. L'utilisation de particules fines augmente cependant considérablement les surfaces d'échange et peut présenter des risques d'inflammation ou d'explosion. Les

poudres les plus fines imposent des modes opératoires particuliers quant à leur manipulation, pour assurer la sécurité de l'opérateur.

Mécanismes de liaison mis en œuvre Plusieurs mécanismes peuvent être utilisés pour lier entre elles les particules de poudre d'alliages métalliques. La figure 1.5 montre les différentes possibilités de liaison entre particules de poudre. Les procédés métalliques lient les particules pour réaliser les pièces par l'action d'un liant, par fusion partielle souvent considérée comme un frittage ou par fusion complète.

L'utilisation d'un liant (procédé SLS) conduit à des pièces composites constituées de particules métalliques dans une matrice polymère. Ce principe de fabrication est parmi les plus rapides mais nécessite une phase d'infiltration et est principalement utilisé en prototypage rapide. La liaison partielle des particules de poudre par frittage (procédé DMLS) permet de réaliser des pièces poreuses métalliques qui peuvent également être infiltrées. La fusion complète (procédés LBM, EBM et DMD) permet l'obtention de pièces denses ne présentant que peu de porosités, soit par projection de poudre, soit par fusion sélective couche par couche. La stabilité de la zone de fusion est très dépendante des paramètres de fabrication et rend complexe le développement et la qualification de nouveaux matériaux.

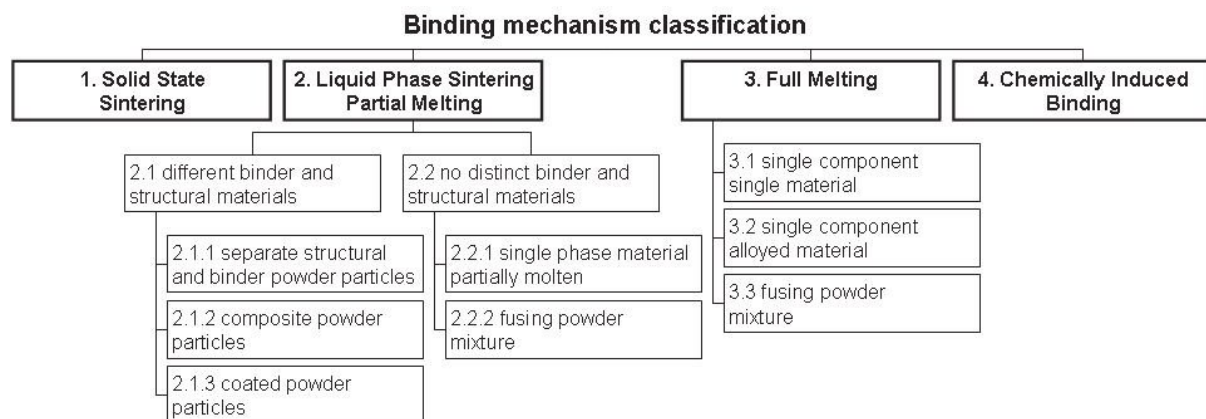


FIGURE 1.5 – Mécanismes de liaison entre particules métalliques [KLKC07]

1.3.2 Les différentes technologies

Les procédés de frittage en couches Le procédé de frittage sélectif par Laser (SLS) est le premier procédé de fabrication additive par lit de poudre inventé. Il a été breveté en 1979 et commercialisé pour la première fois en 1992. Initialement, la poudre utilisée était uniquement composée de polymères semi-cristallins ou amorphes. Depuis les années quatre-vingt-dix, le fabricant DTM a étendu le choix de matériaux disponibles en proposant des matériaux enrobés de polymère servant de liant. Il s'agit de céramiques, destinées à réaliser moules et noyaux, et d'alliages métalliques. Pour ces derniers, à l'issue de sa fabrication, la pièce doit être placée pendant une longue période dans une étuve afin de vaporiser le polymère servant de liant, d'amorcer un frittage sans contrainte et d'infiltrer par capillarité la pièce avec du bronze (la durée de ces opérations se comptant en dizaines d'heures) pour améliorer les propriétés mécaniques de la pièce et remplir les

porosités [KK07]. Ce procédé, généralement utilisé en outillage rapide mais également en fabrication additive métallique, présente une vitesse de fabrication élevée au prix, toutefois, d'une phase de post-production assez longue et de propriétés mécaniques dégradées par rapport au matériau dense [KVVvM05].

Dans les années quatre-vingt-dix, EOS développa une variante du SLS permettant de produire des pièces métalliques sans utiliser de liant polymère, supprimant ainsi la phase de vaporisation de ce liant. L'énergie apportée par le Laser fait alors fondre la couche extérieure des grains métalliques, leur cœur restant solide. Ce métal fondu agit comme un liant en formant des ponts entre grains ; c'est le frittage sélectif direct par Laser (DMLS). La poudre utilisée est parfois un mélange de différents métaux possédant des températures de fusion différentes. Le métal ayant la température de fusion la plus faible fait alors office de liant. Les pièces fabriquées sont poreuses et possèdent des propriétés mécaniques inférieures au matériau dense [KVVvM05]. Cette propriété peut permettre de réaliser des filtres ou des cellules de stockage de gaz par exemple. Si la pièce doit être étanche ou dense, il est également possible de réaliser une infiltration de bronze.

Les procédés de fusion en couches Le procédé de fusion par Laser (LBM, anciennement SLM) fait intervenir des Lasers plus puissants que le procédé DMLS. La densité d'énergie au point focal est alors suffisante pour faire fondre intégralement les particules de poudre. Les pièces réalisées ne présentent pas, ou très peu, de porosités si les piscines de fusion se recouvrent suffisamment. L'optimisation des différents paramètres est importante pour obtenir une bonne qualité surfacique [YBS07] [YGYS10] [YYBS12]. Les pièces réalisées par LBM sont susceptibles de présenter des contraintes résiduelles à l'issue de la fabrication ou des déformations d'origine thermique, à cause du fort gradient thermique au sein de la pièce lors de la fabrication [CCL11]. Les pièces peuvent donc nécessiter des opérations de parachèvement thermique afin de relâcher ces contraintes [MK06].

Le procédé de fusion par faisceau d'électrons (EBM) a été commercialisé par Arcam en 1997 et n'est, aujourd'hui, commercialisé que par cette entreprise. Le principe de fabrication est semblable à celui du procédé LBM en utilisant toutefois un canon à électrons comme source d'énergie. Le guidage du faisceau est réalisé par des bobines au lieu des jeux de miroirs que l'on trouve dans les procédés SLS, DMLS et LBM. L'absence de pièces mécaniques en mouvement pour déplacer la source d'énergie, permet d'atteindre des vitesses de balayage de huit kilomètres par seconde [AB14] contre quelques dizaines de mètres par seconde pour les procédés LBM [Gmb14]. De plus, la forte puissance de la source d'énergie permet d'exploiter les grandes vitesses de déplacement. Ce procédé présente donc une vitesse de fabrication plus importante que les procédés Laser [VVV12b]. Le procédé EBM, en raison de la charge des électrons, nécessite une phase de consolidation de la poudre pour éviter la répulsion électrostatique de ses particules. Cette consolidation est réalisée par chauffage de chaque couche (à une température d'environ 750 °C pour les alliages de Titane par exemple) et limite le gradient thermique lors de la fabrication. Ceci restreint la présence de contraintes résiduelles par rapport aux procédés LBM [HCML⁺08]. En raison de la forte quantité d'énergie à chaque couche, la stratégie de balayage est un facteur important pour contrôler la diffusion de chaleur dans le lit de poudre et améliorer la qualité de la pièce fabriquée [LLH⁺09].

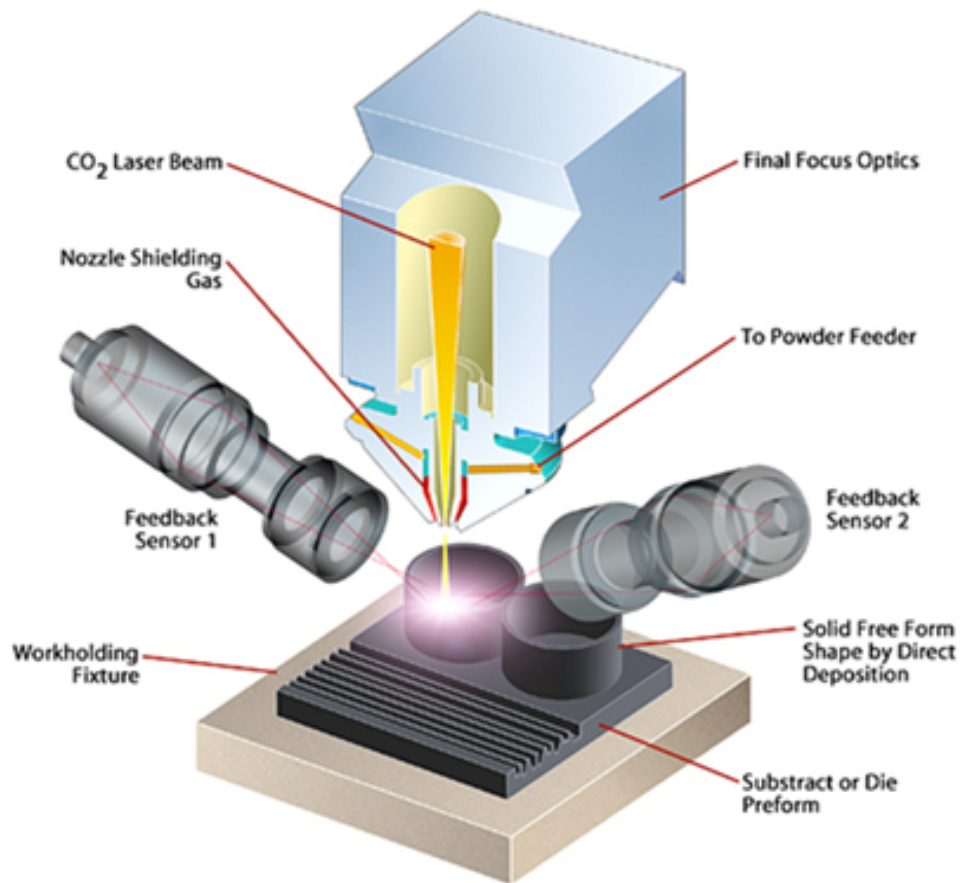


FIGURE 1.6 – Architecture d’une buse de projection du procédé DMD [VVV12b]

Le procédé de fusion par projection directe Le procédé de construction Laser additive directe (CLAD ou DMD) permet de réaliser des pièces métalliques par dépôt de particules en fusion. Les particules de poudre métallique sont d’abord propulsées sur le chemin d’un faisceau Laser afin de les faire fondre, puis projetées sur la zone de fabrication suivant l’axe de la source Laser (Figure 1.6). Ce procédé permet non seulement d’utiliser de nombreux alliages métalliques, mais aussi de changer de matériau en cours de fonctionnement et de manière continue : des pièces présentant des gradients de matériaux peuvent ainsi être produites [YTG⁺05] [MHM13]. La buse permet de réaliser des cordons perpendiculaires au faisceau Laser. Afin de pouvoir élaborer des géométries complexes, elle est généralement montée sur une structure cinq axes. Ce procédé nécessite donc une phase de pré-production plus longue que les procédés en couches dans le but de générer des trajectoires qui peuvent être complexes. Initialement destiné au rechargement des pièces, ce procédé peut être utilisé pour fabriquer directement des pièces finales à haute valeur ajoutée ou pour effectuer des réparations.

1.3.3 Caractéristiques des moyens de fabrication additive

De nombreux travaux ont pour but de caractériser, d’évaluer ou de comparer des moyens de fabrication additive [KVVvM05] [XWL01] [SDD07] [Cas05]. Ces éva-

lutions se focalisent souvent sur la qualité géométrique et surfacique des pièces réalisées ainsi que sur leurs propriétés mécaniques. Les caractéristiques microstructurales de nombreux alliages obtenus par les procédés SLS [KVdSBM96], LBM [TVC⁺10] et EBM [MEQ⁺09] [BPA⁺11] ont également fait l’objet de recherches, notamment pour mettre en évidence une anisotropie suivant l’axe de fabrication vertical en ce qui concerne la croissance des grains.

Qualité surfacique et dimensionnelle Les surfaces des pièces produites par les moyens de fabrication additive présentent une rugosité importante et un aspect granuleux dus à leur fabrication à partir de poudre. Les surfaces réalisées par SLS (et par DMLS suivi d’une infiltration) présentent de meilleurs états de surface que celles fabriquées par LBM ou DMLS non-infiltré grâce à l’apport de bronze qui atténue la rugosité [KVVvM05]. Alors que la rugosité arithmétique des moyens Laser se situe aux alentours de $15\ \mu\text{m}$ [KVVvM05], celle des surfaces réalisées à l’aide du procédé EBM est comprise entre 25 et $35\ \mu\text{m}$ ¹. Les procédés SLS, DMLS et LBM présentent une erreur maximale de 0,1 mm pour une distance de $100\ \text{mm}$ ². Les moyens EBM ont une erreur inférieure à 0,2 mm dans les mêmes conditions², alors que le procédé DMD présente un intervalle d’incertitude de $0,3\ \text{mm}$ ². Ces données montrent que ces procédés présentent des performances du même ordre de grandeur dans le domaine des qualités dimensionnelles. D’autre part, elles ne prennent pas en compte les déformations thermiques qui peuvent se produire lors de la fabrication.

Les valeurs présentées sont théoriques ; en effet, des machines de taille plus réduite existent pour certains procédés (Mésoclade de la société EasyClad pour le procédé DMD par exemple) et permettent la fabrication avec de meilleures qualités. Quel que soit le procédé considéré, les applications qui nécessitent des qualités de surface ou géométriques similaires ou meilleures que celles obtenues par usinage, imposent le recours à des opérations de finition par usinage mécanique, usinage chimique, sablage ou polissage pour respecter ces spécifications.

Vitesse de fabrication Peu de travaux comparent les vitesses de fabrication des différents procédés de fabrication additive car réaliser la même pièce de test, dans les mêmes conditions, avec des moyens de technologies différentes est souvent complexe. Les valeurs ci-dessous sont issues de données constructeur pour des machines permettant d’obtenir des pièces de dimensions « moyennes » (volume de construction d’au moins $200\ \text{mm} * 200\ \text{mm} * 200\ \text{mm}$). Parmi les moyens de fabrication additive permettant la production des pièces métalliques, le SLS ($10\ \text{à}\ 100\ \text{cm}^3/\text{h}$) et le DMLS ($7\ \text{à}\ 70\ \text{cm}^3/\text{h}$) sont sensiblement plus rapides que le LBM ($5\ \text{à}\ 20\ \text{cm}^3/\text{h}$). Les procédés DMD ($10\ \text{à}\ 70\ \text{cm}^3/\text{h}$) et EBM ($55\ \text{à}\ 80\ \text{cm}^3/\text{h}$) produisent des pièces denses, tout comme le LBM, à des vitesses nettement plus élevées que celui-ci [VVV12b]. Ces valeurs sont mesurées pour l’épaisseur de couche maximale (pour les moyens en lit de poudre). Au cours de la fabrication de pièces complexes, pour minimiser l’effet d’escalier [AKL09] et limiter ainsi les opérations de finition, des épaisseurs de couches plus faibles sont à choisir ; la vitesse est alors au niveau de la fourchette basse, voire au-dessous (suivant la méthode de mesure du

1. Donnée constructeur d’Arcam, nos valeurs expérimentales se trouvent au chapitre suivant

2. Donnée constructeur de 3D System, Arcam et POM

constructeur). Il faut aussi noter que ces valeurs sont données pour la fabrication d'une pièce à partir du matériau permettant d'atteindre la vitesse la plus élevée ; l'emploi d'un autre matériau pouvant également ralentir le procédé. Les moyens SLS et DMLS, bien que rapides, nécessitent une opération d'infiltration de près de 24h pour obtenir une pièce quasi-dense [KK07]. Les moyens les plus rapides permettant d'obtenir une pièce dense sont donc l'EBM et le DMD. Ils présentent, en outre, l'avantage de ne nécessiter que peu (EBM) ou pas (DMD) de support, ce qui peut constituer une autre source de gain de temps. La grande vitesse de l'EBM s'explique par la quantité d'énergie, par la vitesse de balayage élevée, et par la possibilité de faire varier le diamètre du spot de 200 μm jusqu'à 1 mm. Il est alors possible de réaliser de petites entités tout en balayant rapidement les grandes surfaces (à comparer au spot de taille fixe de 70 μm de certains procédés LBM par exemple). Des solutions à plusieurs Lasers sont expérimentées pour les procédés SLS, DMLS et LBM [KBC07]. Plusieurs sources Laser effectuent alors le balayage des sections en parallèle. Cette solution, maintenant commercialisée, peut permettre d'augmenter le volume de fabrication de la machine et la vitesse de fabrication [KCDK09].

Propriétés des matériaux Nous avons vu que le recours à des sources d'énergie puissantes permet l'utilisation d'un grand nombre de matériaux. Les propriétés mécaniques des pièces obtenues à l'aide des procédés par fusion respectent les standards des matériaux moulés (Figure 1.7), et parfois les standards des matériaux forgés pour l'EBM [MEQ⁺09], tout en ayant une microstructure maîtrisée [BPA⁺11].

Build Temperature, K (°C)	Yield Strength ($\pm 1\sigma$), MPa	Tensile Strength ($\pm 1\sigma$), MPa	Elongation ($\pm 1\sigma$), MPa
973 (700)	883.7 (± 10.6)	993.9 (± 5.6)	13.6 (± 0.9)
951 (678)	932.4 (± 3.2)	1031.9 (± 2.6)	11.6 (± 1.5)
917 (644)	928.8 (± 5.5)	1028.9 (± 4.3)	13.0 (± 0.7)
899 (626)	938.5 (± 10.9)	1029.1 (± 14.9)	13.2 (± 0.4)
973 (700) HIP	841.4 (± 7.8)	938.8 (± 7.1)	13.6 (± 1.3)
951 (678) HIP	868.4 (± 8.6)	974.2 (± 10.8)	13.4 (± 1.7)
917 (644) HIP	865.6 (± 9.1)	969.2 (± 8.0)	14.0 (± 1.6)
899 (626) HIP	875.2 (± 2.2)	977.6 (± 3.0)	13.6 (± 0.5)

FIGURE 1.7 – Evolution de la limite élastique, de la limite mécanique et de l'allongement à la rupture en fonction de la température de préchauffe des couches en EBM, avec et sans traitement de compression isostatique à chaud (HIP) [ABBZT10]

Les pièces réalisées avec les procédés denses peuvent présenter des porosités fermées qui dégradent leur comportement mécanique, notamment en fatigue [CG95] [GK90]. Ces porosités peuvent être présentes directement au sein des particules de poudre, il s'agit alors de bulles d'argon emprisonnées lors de l'atomisation au gaz, ou n'apparaître que lors de la fabrication [MEQ⁺09]. La détection et la quantification de ces porosités nécessite l'utilisation de moyens d'imagerie 3D tels que la tomographie. Certaines machines récemment mises sur le marché disposent de systèmes optiques dédiés au contrôle in-situ de la fabrication pour détecter la présence de porosités durant le processus de fabrication [AB13].

Impact environnemental La réutilisation directe (après filtrage) de plus de 95 % de la poudre non liée à l'issue de la fabrication, ainsi que la possibilité de fabriquer des pièces moins massives et plus adaptées à leur cahier des charges, sont des caractéristiques qui intéressent grandement les éco-concepteurs [DSRW10]. L'impact environnemental de deux moyens (SLS et LBM) pour la réalisation d'une pièce d'essai a été quantifié [KDYD10] et montre que, contrairement à ce qui est parfois considéré, l'impact de la fabrication n'est pas négligeable par rapport à celui de la phase d'extraction et de création de la matière première. Une analyse complète de l'impact environnemental d'une pièce réalisée par fabrication additive métallique tout au long de son cycle de vie, n'a toutefois pas encore été menée.

1.4 Les procédés additifs dans l'industrie

Les machines de fabrication additive qui produisent des pièces métalliques sont en plein essor depuis ces dix dernières années. La figure 1.8 montre l'impact marginal de la crise économique de 2009 sur cette croissance.

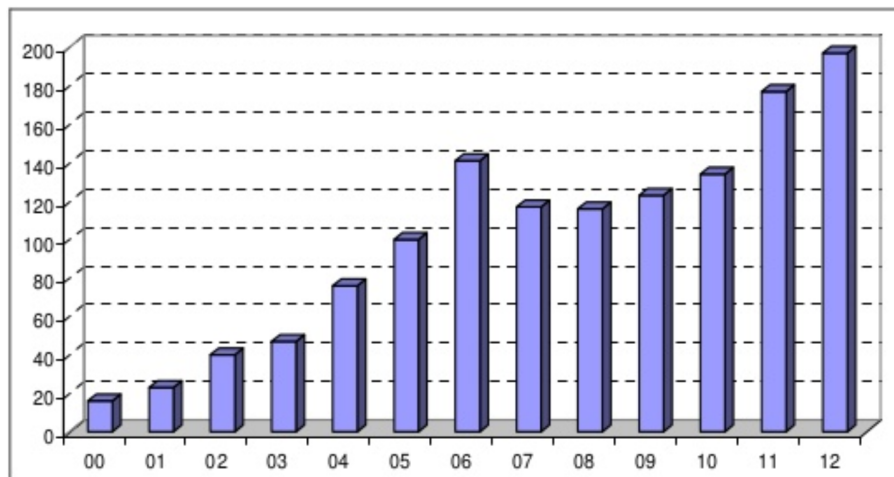


FIGURE 1.8 – Quantité annuelle de machines de fabrication additive dédiées à la production de pièces métalliques vendues de 2000 à 2012 [Woh12]

Une enquête annuelle effectuée auprès d'industriels et de fabricants de machines par Wohler montre qu'en 2011, les procédés de fabrication additive (métalliques et non-métalliques) sont majoritairement employés dans les secteurs des produits de consommation, de l'automobile, du médical et de l'aérospatial (Figure 1.9).

Cette enquête présente aussi la répartition de l'utilisation en fonction des domaines d'application (Figure 1.10). Les moyens de fabrication additive sont toujours majoritairement utilisés par les industriels dans le domaine du prototypage rapide, ce qui s'explique par la présence importante de machines de prototypage rapide dans le parc mondial des machines additives. Plus d'un quart des usages concerne la fabrication d'outillage rapide qui permet d'obtenir un outillage d'injection ou de moulage dans des délais courts et peut autoriser la réalisation des moules avec des canaux de refroidissement conformes

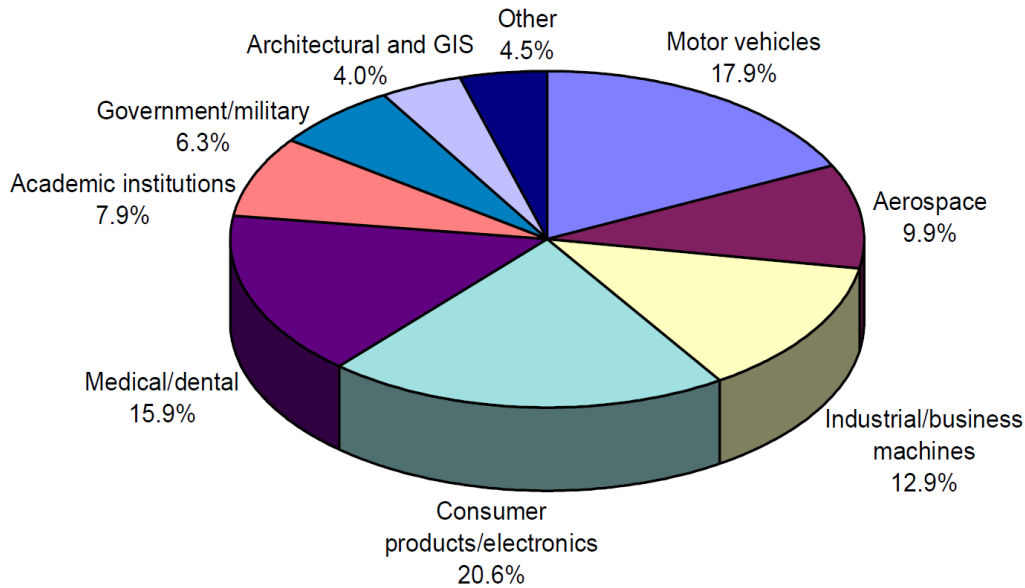


FIGURE 1.9 – Répartition relative de l'utilisation des procédés de fabrication additive par secteur [Woh11]

[XSA01]. Le troisième domaine d'application, avec 16% des réponses, est la production industrielle de pièces.

Les procédés métalliques se trouvent généralement dans les secteurs médical, aérospatial et automobile. Ils sont utilisés pour réaliser des prototypes, des outillages et des pièces. Ce dernier domaine d'application est fortement représenté dans la littérature car il est un moteur important pour le développement de nouveaux matériaux, comme les alliages Ti-Al pour l'aéronautique [MGC⁺10], ainsi que pour la conception de produits innovants, plus particulièrement des structures légères.

1.5 Démarches de conception et procédés de fabrication additive

La conception de pièces élaborées par fabrication additive est traitée dans la littérature de multiples façons. Nous trouvons des exemples de reconception mettant en jeu des optimisations topologiques ou paramétriques, l'émergence de règles de conception à partir de la caractérisation de procédés, des approches utilisant des outils spécifiques, etc. Afin de présenter les différents travaux déjà menés, nous allons dans un premier temps évoquer la conception intégrée de produits mécaniques. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux démarches de *Design For*. Puis, nous verrons les différents travaux qui traitent de la conception, sous le prisme de la fabricabilité des entités géométriques. Nous nous intéresserons ensuite aux différents outils développés pour optimiser les formes réalisées par fabrication additive. Nous terminerons en proposant un aperçu des méthodes de conception pour la fabrication additive.

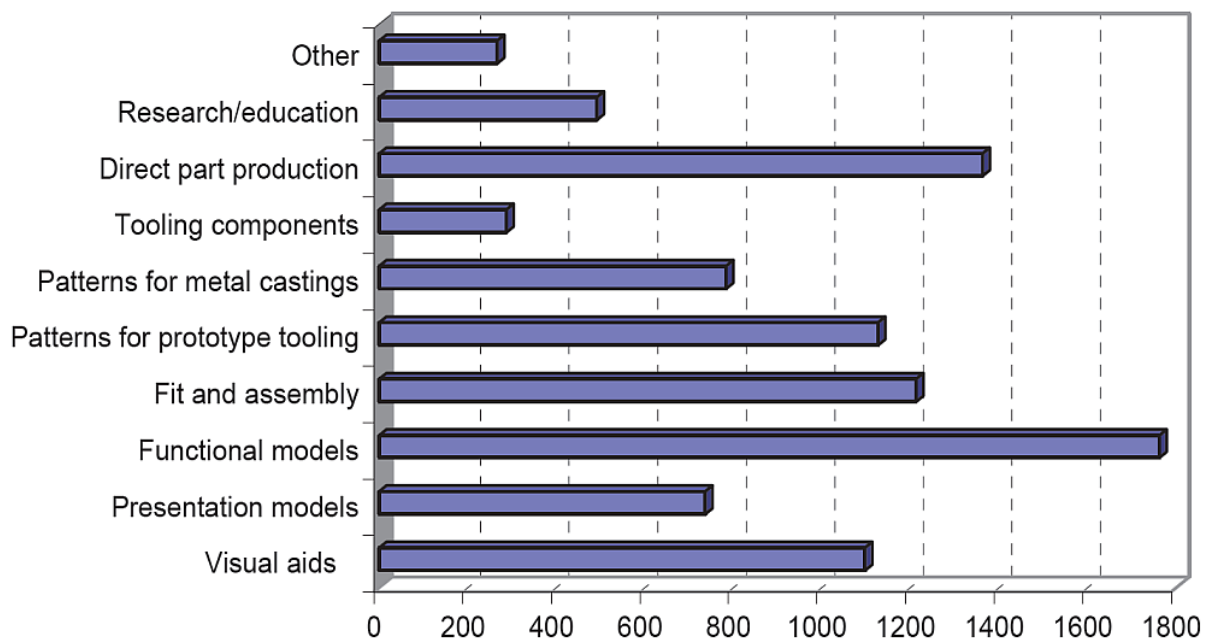


FIGURE 1.10 – Répartition de l'utilisation des procédés de fabrication additive par domaine d'utilisation (en nombre de réponses à une enquête) [Woh11]

1.5.1 Processus de conception intégrée

L'activité de conception consiste, à partir des besoins exprimés et des connaissances existantes, à aboutir à la définition d'un produit qui réponde à ces besoins et qui soit industriellement réalisable. Les activités de conception et de fabrication ont longtemps été considérées comme deux domaines distincts qui devaient être traités par des personnes aux compétences différentes. Cette approche existait dans la dichotomie entre bureau d'études et bureau des méthodes, le premier étant chargé du processus de conception, et le second, du processus de fabrication. Cette approche verticale peut conduire à des mésententes entre concepteurs et fabricants puisqu'aucun n'a de droit de regard sur l'activité de l'autre. Ceci peut aboutir à la conception de pièces qui ne peuvent être réalisées et pour lesquelles les fabricants ont des difficultés à renvoyer les informations nécessaires pour modifier la conception. Nous savons aujourd'hui que l'essentiel du coût final d'un produit est fixé dès les premières étapes de la conception [Per01], il est donc nécessaire que le concepteur prenne en compte les différentes phases de vie du produit. Cette approche globale est celle de la conception intégrée. Elle vise à intégrer l'ensemble des contraintes liées au cycle de vie du produit dès les premières phases de la conception.

Ce principe a donné lieu aux différentes démarches du *Design For*, c'est-à-dire à la volonté d'améliorer l'efficacité du processus de conception de produit, en y intégrant les règles métiers. La première phase de vie à avoir été prise en compte est la phase de fabrication par le *Design For Manufacturing* (DFM) [KHZ01]. Cette démarche a rapidement été déclinée en DFMA, c'est-à-dire en *Design For Manufacturing and Assembly* où sont traitées conjointement les phases de fabrication et d'assemblage [BDK10]. Le concepteur doit utiliser à la fois les règles métiers de la fabrication et de l'assemblage dans son

processus de conception.

Nous parlons aujourd'hui de DFX pour *Design For X* : toutes les phases de vie, dont la fin de vie, peuvent alors être intégrées au processus de conception [SH01]. Le DFX désigne la collection des règles de conception traitant chacune d'un sujet particulier qui influence ou est influencé par la conception du produit. Ces règles proposent généralement des méthodes pour contrôler ou améliorer certains aspects du produit, afin de maximiser ses performances. Les règles de conception pour le *Design For Disassembly* permettent ainsi d'améliorer le désassemblage des produits afin de minimiser l'impact de leur fin de vie [GCB⁺11]. Le DFX est parfois appelé conception pour l'excellence (*Design For eXcellence* [MHB⁺09]) puisqu'il permet de concevoir une pièce qui maximise ses performances tout au long de son cycle de vie.

La prise en compte de la fabrication additive dans le DFX est justifiée si des règles métiers concernant la fabrication peuvent être données aux concepteurs afin que ceux-ci les intègrent dans la phase de conception.

1.5.2 Caractérisation des procédés

Afin de caractériser les performances des procédés de fabrication additive, plusieurs pièces tests ont été proposées [Cas05] [XWL01] [KVVvM05] [SDD07] (Figure 1.11). En présentant une collection d'entités géométriques diverses, ces pièces permettent de discriminer différents procédés de fabrication. Les analyses effectuées sur les pièces réalisées concernent la qualité des surfaces, la qualité dimensionnelle, la qualité géométrique des différentes entités (pour détecter à la fois des déformations et la résolution de fabrication du procédé), la durée de fabrication, la quantité d'énergie consommée, le coût, les propriétés mécaniques, etc.

Les données collectées permettent de valider les données constructeur, de classer différents procédés les uns par rapport aux autres, et de juger de l'adéquation entre un moyen et une application particulière. Un travail exhaustif a ainsi été réalisé afin de caractériser précisément le type de formes géométriques réalisables sur une machine LBM [Tho10] pour établir des préconisations de conception pour ce procédé. Ce travail a consisté à déterminer la fabricabilité d'un ensemble de formes géométriques par quantification des écarts entre la forme souhaitée et la forme obtenue.

Ce type d'approche, très lié à un procédé particulier, permet de créer une base de données d'entités géométriques réalisables qui offre au concepteur la possibilité de valider la conception d'une pièce. Toutes les contraintes de fabrication ne sont cependant pas prises en compte. L'approche géométrique ne permet pas de savoir si l'intégrité de la matière est acceptable, ni de connaître les contraintes d'enlèvement de la poudre non liée par exemple. Les géométries testées sont, de plus, classiques puisqu'il ne s'agit que des voiles minces, alésages cylindriques, cylindres, etc.

1.5.3 Optimisation de formes des pièces réalisées par fabrication additive

Deux types d'outils sont utilisés pour optimiser la géométrie des pièces réalisées par fabrication additive : l'optimisation paramétrique et l'optimisation topologique. L'optimisation paramétrique consiste à obtenir un jeu de paramètres qui définissent une géométrie

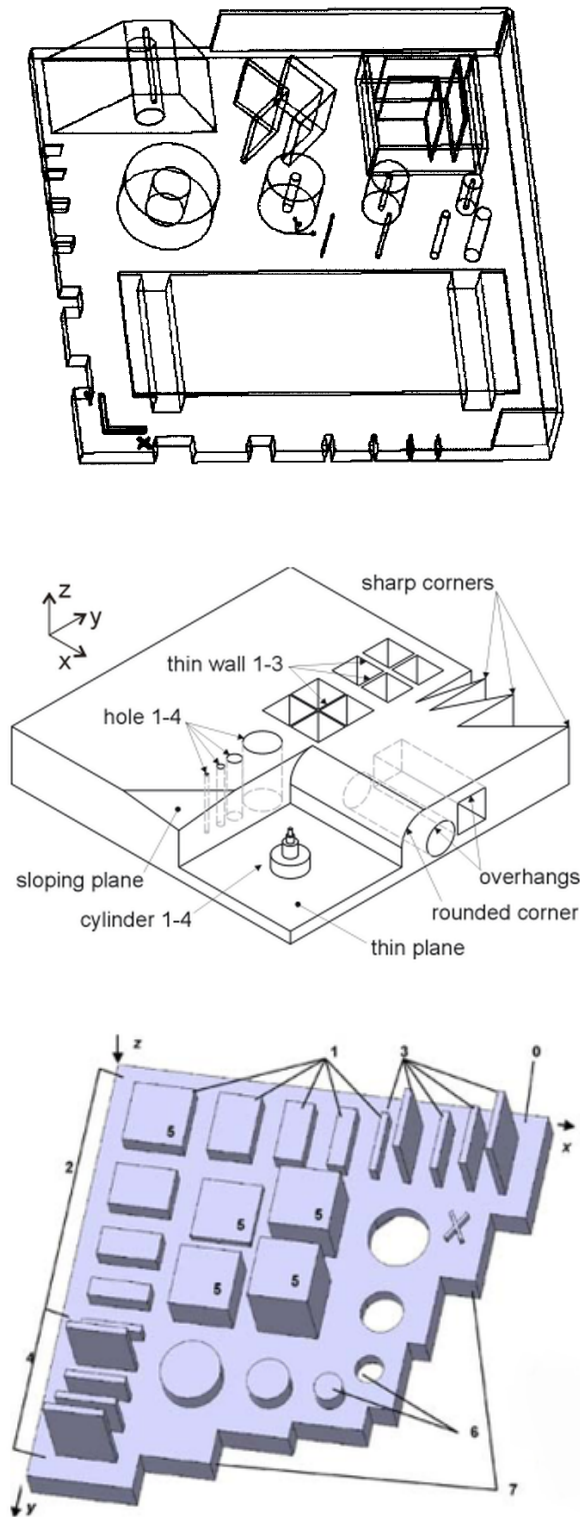


FIGURE 1.11 – Pièces proposées pour caractériser les performances de procédés de fabrication additive [XWL01] [KVVvM05] [SDD07]

(épaisseurs, longueurs, rayons, etc) optimale par rapport à un critère. Ce type d'optimisation demande la définition d'une géométrie initiale. Les applications en fabrication additive concernent l'optimisation de treillis par rapport à des chargements spécifiques [RT11] (Figure 1.12) ainsi que la validation de formes obtenues par optimisation topologique.

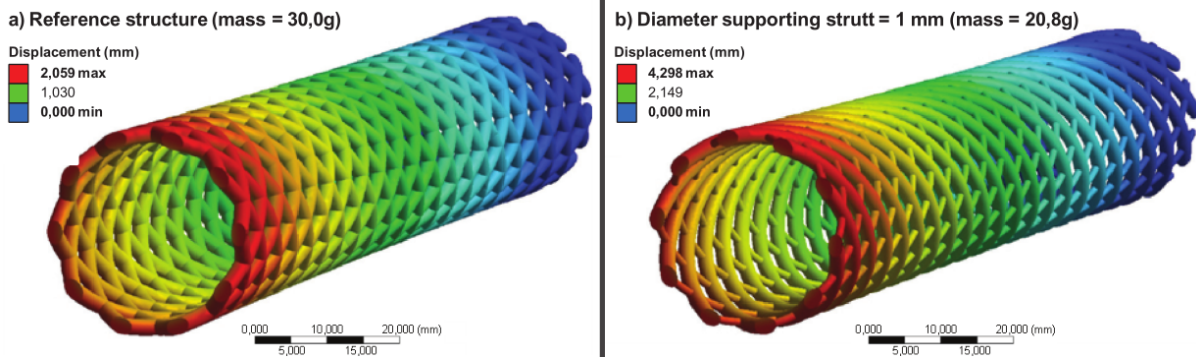


FIGURE 1.12 – Élément de treillis à l'état initial à gauche et optimisé paramétriquement par rapport à un chargement en torsion pour réduire sa masse à droite [RT11]

Les moyens d'optimisation topologiques sont souvent employés pour générer la forme de pièces à partir d'un chargement mécanique [BS03]. Deux méthodes d'optimisation topologiques existent aujourd'hui : la méthode d'homogénéisation et la méthode de variation de frontière [Las11]. Cette dernière méthode consiste à faire varier la position de la frontière de la forme sans créer de nouveaux trous ; la géométrie de la pièce optimisée est donc très dépendante de la géométrie initiale. La méthode d'homogénéisation, utilisée dans la plupart des logiciels destinés aux concepteurs, consiste à définir une densité comme objectif pour un chargement donné. Cette méthode permet d'associer de la matière aux champs de contraintes calculés afin de générer une géométrie. La forme initiale est généralement un volume large à partir duquel la matière est enlevée jusqu'à atteindre l'objectif de volume défini [ESKW11]. La figure 1.13 montre l'application de l'optimisation topologique au cas de la reconception d'un bras de char d'assaut. Le concepteur définit un objectif de densité ainsi que la géométrie initiale, le maillage et le chargement de la pièce. L'algorithme d'optimisation topologique enlève ensuite les éléments les moins sollicités jusqu'à atteindre l'objectif de densité spécifié. La forme obtenue n'est pas directement exploitable. D'une part, elle peut être discontinue, d'autre part la géométrie n'est pas dimensionnée car l'algorithme d'optimisation topologique ne permet généralement pas de vérifier la valeur des contraintes maximales dans la pièce. Le module d'ANSYS ne permet, ainsi, de récupérer qu'un ensemble discontinu d'éléments discrets qui valident l'objectif de densité [CT01]. Une phase de reconception est, par conséquent, nécessaire pour aboutir à la géométrie finale de la pièce. Des travaux ont été menés pour automatiser cette phase de reconstruction et générer des volumes continus à partir de l'ensemble des éléments discrétisés [KK06]. C'est travaux ont été appliqués à la reconception de volumes denses de grandes dimensions, il ne sont cependant pas employés dans les outils que nous avons utilisés.

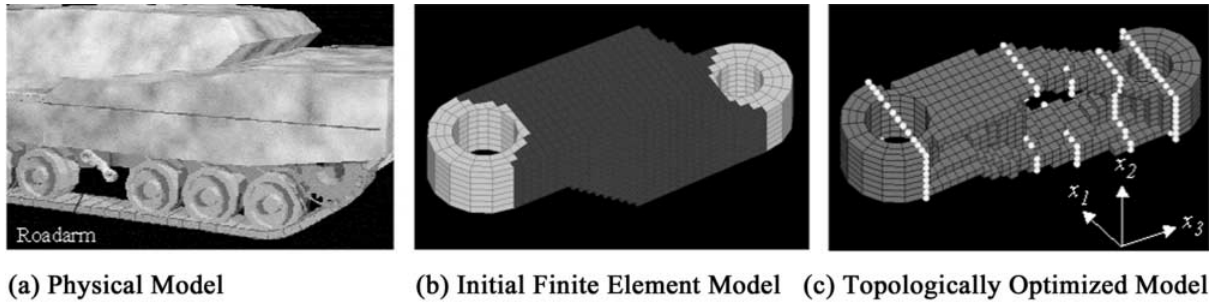


FIGURE 1.13 – Reconception d’une pièce mécanique par optimisation topologique [CT01]

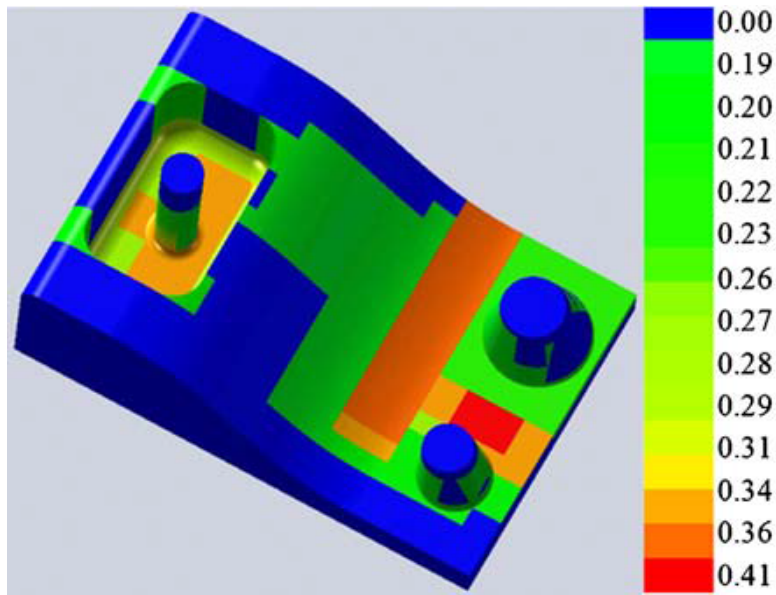


FIGURE 1.14 – Représentation de l’indice de complexité de fabrication calculé sur une pièce exemple réalisée par fabrication hybride [KMH10]

1.5.4 Méthodes DFAM existantes

Il n’existe aujourd’hui que très peu de méthodes de conception pour la fabrication additive (*Design For Additive Manufacturing* - DFAM). Certaines démarches de DFAM ont pour but d’aider le concepteur à choisir le procédé additif le plus adapté à partir d’une base de données [MLLL10] [KBS⁺12]. Cette base de données est enrichie à partir des résultats déterminés à l’aide des pièces tests vues précédemment [IIG95] [BVBD11]. Des travaux ont été menés sur la fabrication hybride [KSCB10], c’est-à-dire l’utilisation conjointe de moyens conventionnels et additifs pour réaliser des pièces mécaniques. Ces travaux associent un moyen de fabrication additif ou soustractif à chaque entité géométrique à partir du calcul de leur complexité de réalisation pour choisir le moyen de fabrication le plus adapté [KMH10] (Figure 1.14). D’autres démarches permettent de choisir l’orientation optimale de la pièce dans la machine de fabrication additive afin de réduire son temps de fabrication et son coût, ou d’améliorer les états de surfaces [PVRD07] [BL06]. Ces démarches sont cependant destinées aux procédés plastiques et ne

prennent pas en compte la composante thermique des procédés métalliques.

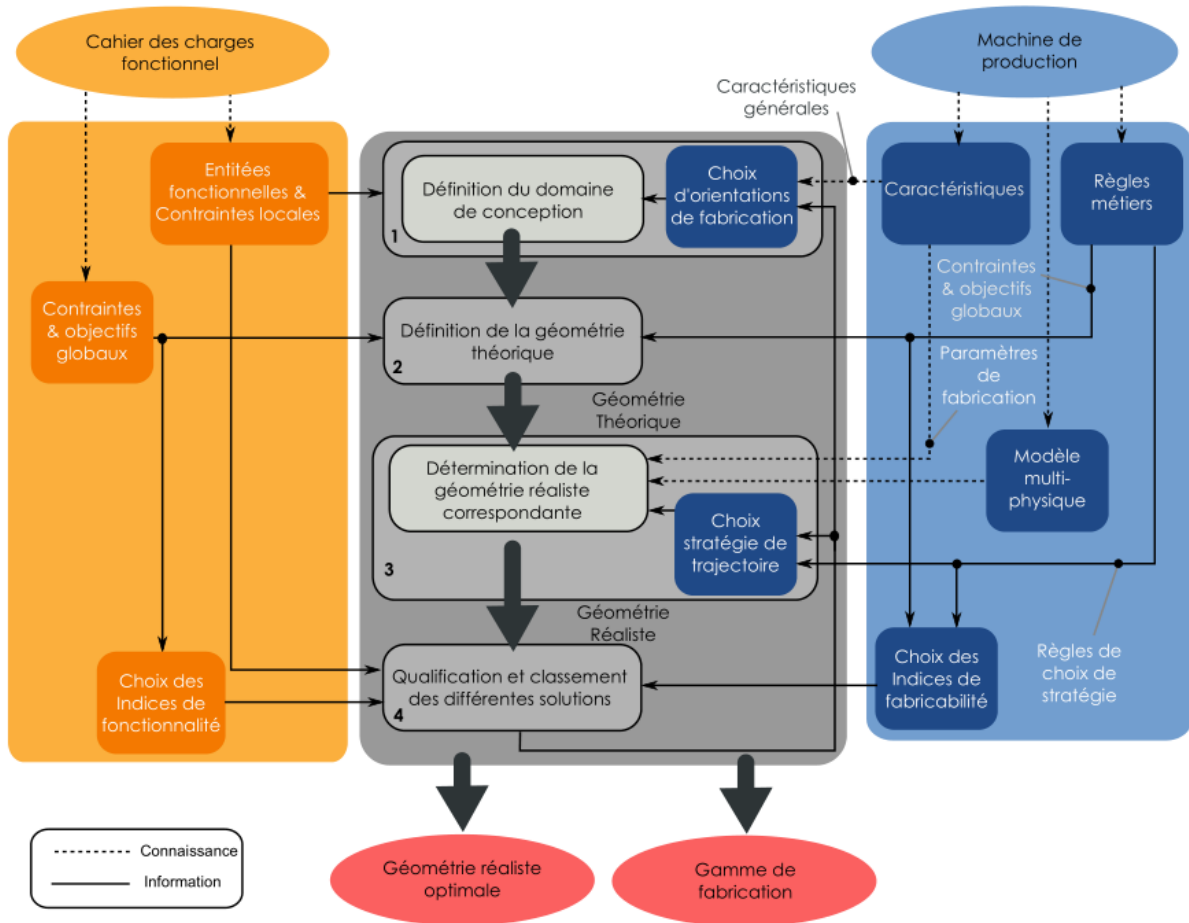


FIGURE 1.15 – Démarche de conception globale pour la fabrication additive [Pon13]

Les démarches globales proposées concernant la géométrie des pièces considèrent souvent qu'il n'y a pas de contrainte de fabrication et que toute géométrie est fabricable [BRCR13]. Des travaux présentés récemment proposent une démarche de conception globale pour la fabrication additive qui tire parti de l'optimisation topologique pour établir une géométrie théorique tout en tenant compte des contraintes de fabrication afin de concevoir des pièces fabricables [Pon13] (Figure 1.15). Cette dernière démarche est focalisée sur les procédés de fabrication additive par projection de poudre en fusion (DMD) et ne prend pas en compte les spécificités des procédés en couches (exigences comme libertés).

1.6 Conclusion de l'étude bibliographique

Nous avons vu, dans un premier temps, l'état de l'art des procédés de fabrication additive, avant de nous focaliser sur les procédés métalliques qui sont les plus prometteurs en termes de production mécanique. Ces technologies de fabrication sont aujourd'hui utilisées dans l'industrie pour réaliser des pièces mécaniques à haute valeur ajoutée. Parmi les

procédés métalliques, trois procédés offrent la possibilité de réaliser des pièces métalliques denses : les procédés LBM, DMD et EBM.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux travaux sur la conception de pièces pour la fabrication additive. Notre étude bibliographique montre que les contraintes de fabrication ne sont que partiellement explicitées. Des outils performants, tels que l'optimisation topologique, ont été utilisés afin de concevoir des pièces mais ils ne permettent pas de prendre en compte les contraintes de fabrication des procédés. Des travaux récents ont proposé une démarche de conception adaptée à la fabrication additive directe. Elle prend en compte les contraintes de ce procédé, mais n'est pas adaptée à la fabrication additive en couches. Il n'existe donc pas, aujourd'hui, de démarche globale de conception tenant compte de l'ensemble des contraintes de fabrication des procédés additifs. En particulier, nous n'avons pas connaissance d'approches dans le domaine de fabrication additive par couches.

Parmi les freins à l'utilisation de ces moyens, figurent le manque d'informations concernant les caractéristiques et les capacités des procédés, ainsi que l'absence d'outils pour fournir ces informations aux concepteurs. Notre question relative au besoin de concevoir spécifiquement pour la fabrication additive semble avoir obtenu une réponse positive dans la littérature. Il est cependant nécessaire d'explicitier les changements que ces procédés amènent dans la conception de produits, pour établir des contraintes de fabrication et des critères de conception. Ces derniers seront ensuite utilisés dans une démarche de DFX pour permettre de tirer parti de la fabrication additive, en démultipliant ses points forts et en atténuant ses points faibles.

Chapitre 2

Faut-il concevoir pour la fabrication additive en couches ?

2.1 Introduction

Les procédés de fabrication additive sont aujourd’hui utilisés pour produire des pièces industrielles. La forme des pièces n’est généralement pas remise en question malgré l’utilisation de ces nouveaux procédés. Dans un contexte de conception où il faut tenir compte à la fois des exigences du cahier des charges fonctionnel et de celles issues du processus de fabrication (DFM), il est pourtant essentiel de savoir si l’utilisation d’un moyen modifie ces exigences.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l’influence des moyens de fabrication additive en couches sur le domaine de conception. Nous verrons les libertés, au regard des procédés actuels, qu’ils introduisent ainsi que leurs contraintes spécifiques. Cette approche se fera sous le prisme de la conception en présentant les évolutions du domaine des possibles en conception de produits par rapport aux procédés conventionnels.

Dans un premier temps, nous rappellerons brièvement l’impact de trois procédés conventionnels sur la conception. Nous montrerons ensuite l’évolution du domaine des possibles en conception de produits, apportée par les procédés additifs, à partir d’exemples que nous avons réalisés par EBM. Nous considérerons l’accessibilité à l’intégralité du volume de fabrication, la problématique de la fabricabilité, la nécessité de récupérer la poudre non liée, la qualité des pièces réalisées et les matériaux disponibles.

2.2 Domaine de conception pour les principaux procédés conventionnels

Nous allons nous intéresser à la conséquence de l’utilisation de trois procédés de fabrication conventionnels, sur la conception de produits. Leurs contraintes de fabrication ont abouti à l’expression de règles de conception qui permettent de concevoir des pièces fabricables. Les procédés que nous allons considérer sont l’usinage, principal procédé de fabrication soustractif, la fonderie, procédé additif traditionnel, et la forge, procédé de mise en forme par déformation plastique dans une empreinte.

2.2.1 Usinage

L’usinage consiste à fabriquer des pièces par l’enlèvement de matière à l’aide d’outils coupants, à partir d’un volume brut. L’ensemble outils de coupe, machine et matière détermine les limites en termes de dimensions réalisables mais aussi d’accessibilité aux zones à usiner qui est un facteur essentiel de la fabricabilité des pièces.

Entités géométriques réalisables par usinage Les surfaces réalisées par usinage sont élaborées soit par travail de forme, soit par travail d’enveloppe. Le travail de forme consiste à fabriquer un volume par le travail de l’arête de coupe de l’outil. Les volumes obtenus sont alors généralement simples : cylindres, cylindres étagés, filetages, gorges, etc. Le travail d’enveloppe est la réalisation de surfaces par l’action de l’arête de coupe ou d’un point de l’arête de coupe, associé à un déplacement de l’outil. Il est alors possible de fabriquer des volumes prismatiques en fraisage, des poches, des volumes coniques, etc. La réalisation de volumes composés de surfaces planes ou axi-symétriques est possible

par contact direct entre la pièce et l'arête de coupe ou par déplacement simple de celle-ci, par rapport à la pièce. La réalisation de surfaces non-développables (telles les pales de la turbine de la figure 2.4) demande la génération de trajectoires sophistiquées. Ce type de surfaces est d'ailleurs qualifié de "complexe" à cause de la complexité des stratégies de balayage.

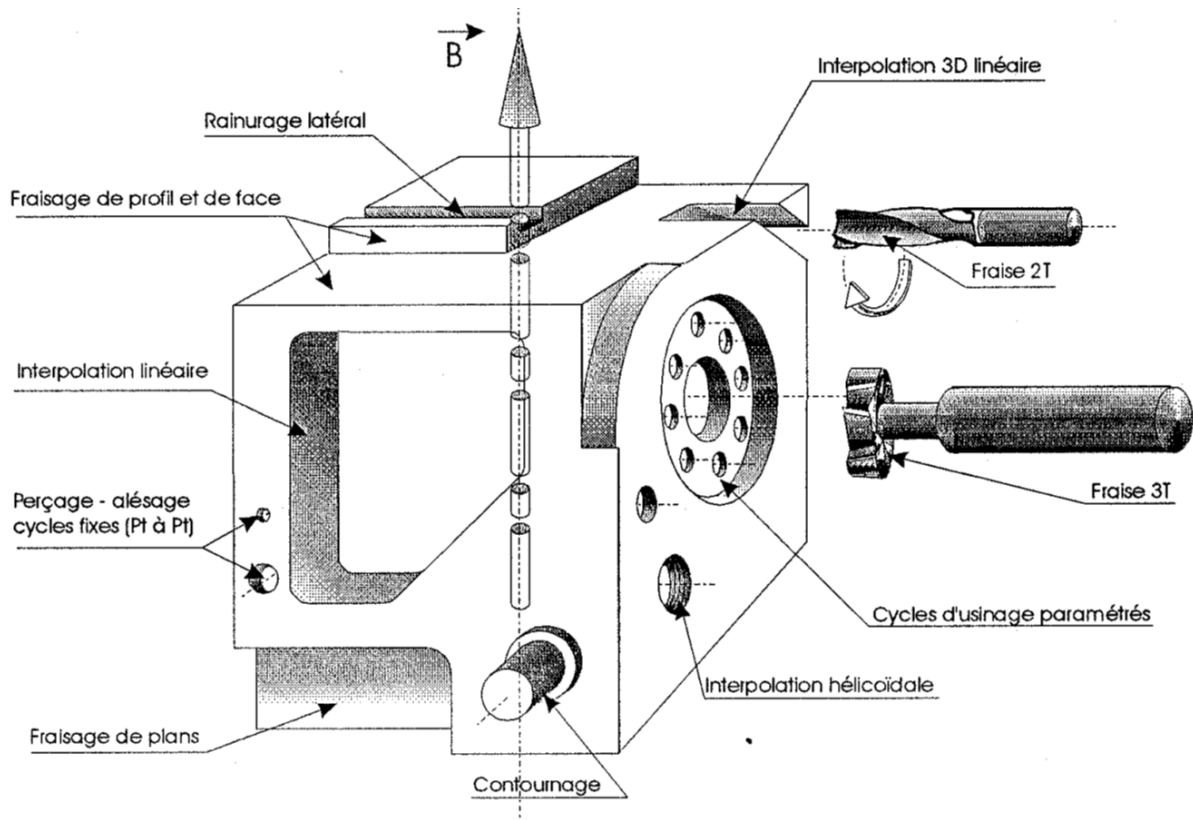


FIGURE 2.1 – Possibilités d'usinage à l'aide d'un centre 4 axes [ACMV97]

Les pièces réalisées en usinage sont donc en grande partie composées de plans et de cylindres (Figure 2.1). Si nécessaire, des surfaces complexes peuvent être obtenues mais dans ce cas, les temps de fabrication et les coûts augmentent considérablement.

Accessibilité et orientation des entités à usiner Les opérations d'usinage, qu'il s'agisse de travail de forme ou d'enveloppe, nécessitent que les surfaces ou volumes soient accessibles aux outils de coupe, c'est-à-dire que les outils puissent réaliser les opérations sans entrer en collision avec d'autres parties de la pièce (ou avec le posage et la structure de la machine). L'utilisation de machines disposant de cinématiques 5 axes peut permettre de réaliser des opérations complexes comme des balayages de surfaces gauches. Il n'est cependant pas possible de fabriquer des treillis fins par exemple (Figure 2.6), car les outils ne peuvent atteindre toutes les surfaces à usiner. Afin d'améliorer la productivité et de baisser le coût de fabrication, il est également recommandé que les surfaces réalisées par usinage aient la même orientation et se trouvent à la même hauteur (exemple de règles métiers pour le fraisage [PBFG07], figure 2.2).

PS	Guidelines	Objectives	Wrong	Right
To	Aim for straight milling surfaces (form tools are expensive); select dimension for gang milling.	C		
To	Provide runouts for edge mills (edge milling is cheaper than end milling).	C Q		
To	Adapt runout to milling tool diameter. Avoid long milling cuts by selecting curved surfaces (e.g. slots).	C		
Ma	Arrange surfaces on one level and parallel to the clamping.	C Q		

FIGURE 2.2 – Règles de conception pour la fabrication de pièces en fraisage [PBFG07]

Dimensions réalisables Les dimensions minimales obtenues par travail de forme, tels les diamètres de trous cylindriques, dépendent directement des dimensions de l'outil choisi. La réalisation de micro-usinages demande des outillages spécifiques, ainsi que des machines ayant des broches avec des vitesses de rotation très élevées (pour avoir une vitesse de coupe correcte malgré des diamètres d'outils faibles) [BLO05]. La réalisation de voiles minces ou d'autres volumes de faible épaisseur, est rendue complexe par les vibrations et par les déformations élastiques qui ont lieu lors des opérations d'usinage. Si l'utilisation de moyens UGV (Ultra Grande Vitesse) permet de réduire ces phénomènes, il reste très difficile de réaliser des géométries avec des épaisseurs fines [ST97].

2.2.2 Fonderie

La fonderie est le principal procédé de mise en forme par fusion et coulée. Les contraintes de ce procédé proviennent de celles liées à la réalisation du moule, à la forme des noyaux utilisés pour réaliser les formes creuses intérieures, au remplissage du moule et à la phase de refroidissement.

Fabrication du moule Les coquilles et les plaques modèles qui servent à réaliser des moules en sable sont principalement fabriquées par usinage. Elles sont donc tributaires des contraintes de ce procédé, notamment en ce qui concerne l'accessibilité des surfaces. La présence de volumes creux nécessite l'utilisation de noyaux. Dans la mesure du possible, cette utilisation est à éviter. Si les noyaux sont indispensables, ils doivent avoir des formes simples (pavés rectangulaires ou trapézoïdaux, cylindres).

Remplissage du moule Lors de la coulée, le moule doit se remplir de la façon la plus homogène possible pour éviter les accélérations et décélérations du fluide qui peuvent provoquer des défauts. Les variations de sections doivent être douces, les arêtes doivent être remplacées par des congés et les épaisseurs doivent permettre le bon remplissage du moule.

Démoulage des pièces Mis à part le moulage à la cire perdue qui nécessite la destruction du moule, le démoulage des pièces implique que toutes les surfaces du moule permettent cette opération. Il faut donc proscrire les surfaces en contre-dépouilles et donner une pente aux surfaces perpendiculaires au plan de démoulage. Les formes doivent d'autre part, tenir compte de la position du plan de joint afin de minimiser les défauts en cas de mauvais alignement des deux parties du moule.

Gradient de refroidissement Lors du refroidissement, le phénomène de retrait doit être homogène sous peine de provoquer des déformations ou la présence de contraintes résiduelles au sein de la pièce. Les volumes de la pièce doivent donc être répartis de manière homogène pour éviter la présence de zones restant chaudes lors du refroidissement. Il faut par ailleurs, limiter les masses de matière concentrée.

2.2.3 Forgeage

Le procédé de forgeage est un procédé de fabrication par déformation plastique d'un lopin par une presse. Le lopin est mis en forme dans une matrice ou des empreintes. La forme des pièces est contrainte par la forme des empreintes, leur phase de remplissage et la phase de retrait des pièces.

Fabrication des empreintes La fabrication des empreintes est généralement effectuée par usinage ou par électro-érosion. Les formes réalisables sont donc limitées par les contraintes de ces deux procédés, notamment les contraintes d'accessibilité.

Remplissage des empreintes Le remplissage des empreintes se fait par déformation plastique. Les efforts mis en jeu sont souvent très importants et sont limités à la fois par la capacité de la presse utilisée et par la pression admissible par la matrice ou l'empreinte. Pour limiter l'effort nécessaire, les sections fines et les trous de faible diamètre sont à éviter puisque leur remplissage nécessite de fortes pressions et peut également conduire à la présence de défauts. De plus, les changements de section doivent être doux et les formes être les plus symétriques possibles pour garantir un remplissage homogène. Les arêtes doivent être remplacées par des congés pour diminuer l'amplitude de la déformation plastique et donc la pression nécessaire. Enfin, pour limiter l'usure des empreintes, le plan de joint ne doit pas être brisé.

Retrait des pièces Comme pour le procédé de fonderie, les pièces doivent être retirées des empreintes une fois fabriquées. Il est donc nécessaire de donner une pente aux surfaces perpendiculaires au plan de joint (angle de dépouille).

2.2.4 Conclusion

De nombreuses décennies d'utilisation des procédés conventionnels ont permis d'établir des règles de conception qui tiennent compte des contraintes de fabrication des procédés lors de la phase de conception. Les contraintes de fabrication proviennent à la fois du principe de mise en forme du procédé (efforts de coupe en usinage, effets thermiques et coulabilité en fonderie, efforts et déformation plastique en forge), de limites d'accès à certains volumes (accès des arêtes de coupe en usinage, accès des noyaux en fonderie) et de limites liées à l'outillage (dimensions maximales et minimales, pressions maximales, etc). Il est donc important de s'intéresser à ces trois aspects pour les procédés de fabrication additive.

2.3 Évolution du domaine des possibles en conception de produits fabriqués par procédés additifs métalliques

Les procédés additifs métalliques en couches reposent sur la réalisation de pièces par couche, au sein d'un volume de poudre, par fusion locale. Les contraintes de fabrication de ces procédés sont différentes de celles des procédés conventionnels. Dans un contexte de conception intégrée, cela implique une évolution du domaine des possibles dans la conception de produits.

La fabrication additive en couches consiste à réaliser des pièces couche par couche. Dans une couche, la source d'énergie fond localement la poudre d'alliage en n'importe quel endroit. On peut donc fondre, dans le plan, toute surface supérieure ou égale à la zone de fusion minimale. La zone fondue a également une profondeur suivant l'axe vertical. Tridimensionnelle, elle forme un voxel. Grâce à la superposition des couches, il est possible d'accéder à tout voxel présent dans le volume de fabrication de la machine, s'il respecte les dimensions minimales. A cause des phénomènes thermiques mis en jeu et notamment du besoin de dissiper l'énergie de la zone de fusion vers la structure de la machine, tous les voxels ne sont cependant pas fabricables. Le lit de poudre qui entoure la zone de fusion lors de la fabrication, impose une opération de dépoudrage une fois la fabrication terminée, la récupération de la poudre pouvant d'ailleurs être critique pour certaines applications ne tolérant pas le relargage de poudre. Le lit de poudre a également un impact sur la qualité des pièces obtenues. Enfin, le choix de matériaux qualifiés pour ces procédés est également une contrainte de fabrication qui influe sur la conception.

2.3.1 Accessibilité de l'intégralité du volume de fabrication

L'accès à l'intégralité du volume de poudre permet la réalisation de pièces élancées, de pièces complexes, de structures légères bi ou tridimensionnelles ainsi que la fabrication de mécanismes sans assemblage.

Pièces élancées L'accessibilité totale et l'absence d'effort lors de la mise en forme permettent la réalisation de pièces peu épaisses et de grandes dimensions. Ce type de pièces permet de profiter d'un autre avantage des procédés additifs : étant donné que seul

le volume de la pièce est fondu durant la fabrication, la vitesse de fabrication relativement faible des procédés additifs peut être compensée par le faible volume de ces pièces. De même, le coût en matières premières est limité à la seule quantité nécessaire. Enfin, les pièces élancées présentent l'avantage de faciliter la fabrication en évitant les accumulations d'énergie.

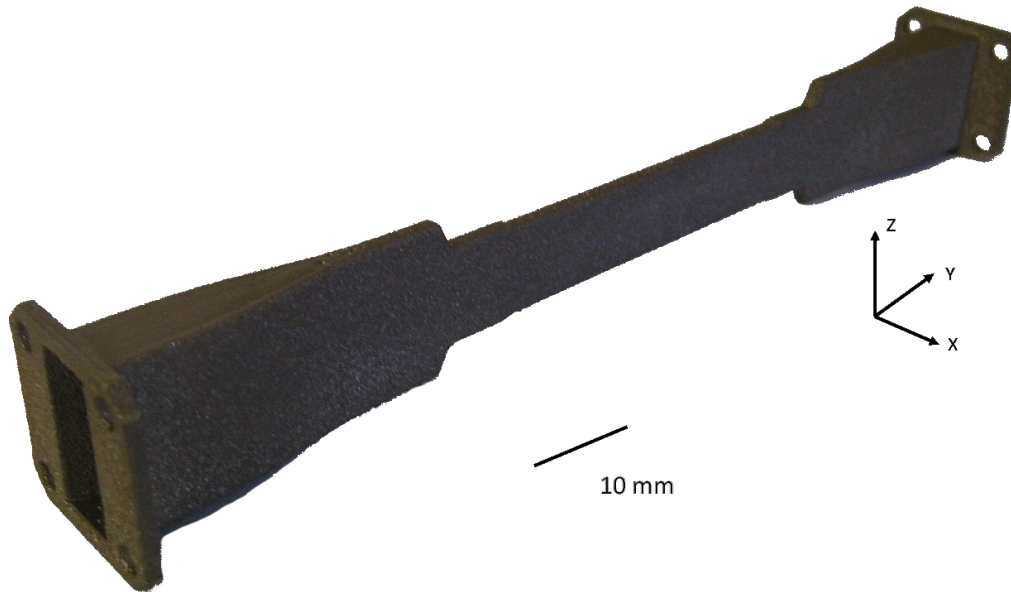


FIGURE 2.3 – Guide d'onde réalisé en Ti6Al4V par EBM pour le CERN

Une illustration courante de pièce fine et élancée concerne les tubulures de faible épaisseur. Ce type de pièce nécessite une épaisseur minimale de matière afin de limiter la masse, tout en garantissant l'étanchéité entre l'intérieur et l'extérieur de la tubulure. Nous avons réalisé plusieurs pièces de ce type, dont un guide d'onde destiné au CERN (Figure 2.3). Le guide d'onde, élancé et fin, a pour dimensions maximales 200 mm * 27 mm * 28 mm, et ses parois minces ont une épaisseur de 0,6 mm.

Pièces complexes et contre-dépouilles Les procédés additifs ne rencontrent pas de difficulté pour réaliser des pièces complexes. La turbine (Figure 2.4) est un exemple classique de pièce présentant des surfaces complexes. Cette pièce est généralement obtenue par usinage (toutes les surfaces sont accessibles avec une machine 5 axes). Grâce à l'accès à l'intégralité du volume de fabrication, les procédés de fabrication additive rendent également possible la réalisation de pièces présentant des surfaces en contre-dépouilles, c'est-à-dire des surfaces inaccessibles aux outils de coupe et non réalisables en moulage sans destruction du moule. Pour reprendre l'exemple précédent, il est possible de réaliser la même turbine en ajoutant un carénage autour des pales (Figure 2.5). Si une telle modification rend la fabrication impossible avec les procédés conventionnels, elle reste possible en fabrication additive. Nous avons ainsi pu fabriquer ces deux pièces sans plus de difficultés que pour une pièce prismatique simple.

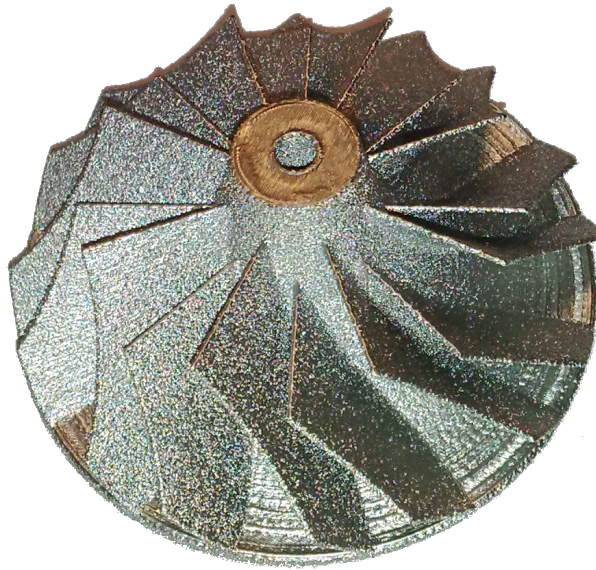


FIGURE 2.4 – Turbine en Ti6Al4V réalisée par notre moyen EBM

Structures légères Comme précisé ci-dessus, les pièces fines et élancées peuvent être réalisées par les moyens de fabrication additive. Ces pièces sont généralement peu complexes (une épaisseur fine dans une seule direction). L'accès à l'intégralité du volume de fabrication rend possible la production de pièces fines dans deux ou trois directions : nous pouvons donc réaliser de véritables structures légères avec des éléments de différentes dimensions. Les applications possibles sont multiples. L'augmentation de la surface pour un volume équivalent peut être utilisée pour réaliser des échanges thermiques ou des catalyseurs. Des treillis constitués de poutres peuvent servir de filtres, ou bien être utilisés comme éléments de structure (Figure 2.6).

Un nouveau type de matériaux devient donc accessible aux concepteurs puisque les procédés additifs permettent de réaliser des matériaux dits "architecturés". On désigne par matériaux architecturés (Figures 2.7) les structures à échelle méso (du dixième de millimètre au centimètre) qui peuvent être considérées comme un matériau composite "alliage métallique - air", dont la géométrie (taille et orientation des cellules) permet de réaliser des compromis entre maximisation de la rigidité et minimisation de la masse ou entre d'autres propriétés contradictoires. Ce type de structures a de nombreuses applications, notamment pour obtenir un matériau présentant un comportement mécanique particulier. Le monde médical est ainsi intéressé par l'utilisation de treillis afin d'obtenir des pièces ayant une rigidité proche de celle des os (bien inférieure à celle des alliages de Titane dont sont constituées les prothèses). Une telle utilisation permet en outre, d'exploiter ces structures afin de favoriser l'ostéo-intégration.

Pièces imbriquées et assemblages L'accessibilité de tout voxel, dans l'espace de fabrication, permet également d'envisager la réalisation de volumes superposés suivant l'axe vertical et séparés par quelques couches de poudre non fondue. Tous les procédés ne permettent cependant pas d'effectuer ce type de fabrication sans utiliser des supports. Le procédé EBM permet de produire des pièces imbriquées les unes dans les autres. Il



FIGURE 2.5 – Turbine carénée réalisée par notre moyen EBM

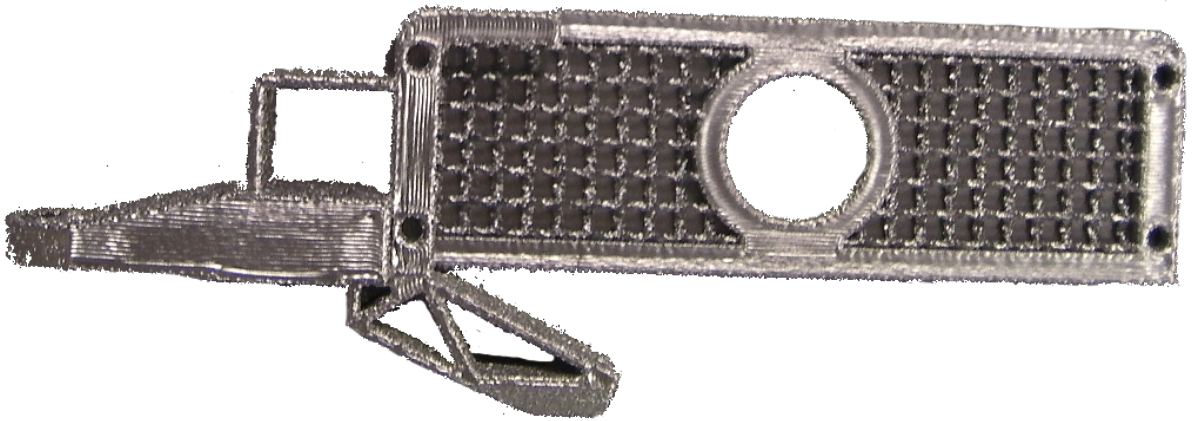


FIGURE 2.6 – Pièce présentant une structure en treillis réalisée par notre moyen EBM

est donc possible de fabriquer des mécanismes ne nécessitant pas d'assemblage. Nous avons réalisé une pièce qui illustre cette possibilité. Elle est composée de sept sphères creuses et largement évidées, imbriquées les unes dans les autres avec des jeux de quelques millimètres (Figure 2.8). Ces sept sphères sont libres et se déplacent les unes par rapport aux autres. Il s'agit d'un mécanisme non démontable avec six degrés de mobilité par pièce, réalisé en une opération. La possibilité de produire des mécanismes en une fois est un changement majeur dans le domaine de la conception de produits. Nous reviendrons ultérieurement sur les implications d'un tel changement.

2.3.2 Fabricabilité au sein du volume de fabrication

Nous avons vu précédemment que tout voxel de matière est accessible au sein du volume de fabrication d'une machine. Tout voxel n'est cependant pas toujours fabriquable. Le cas le plus favorable concerne la réalisation d'empilements de volumes fondus les uns

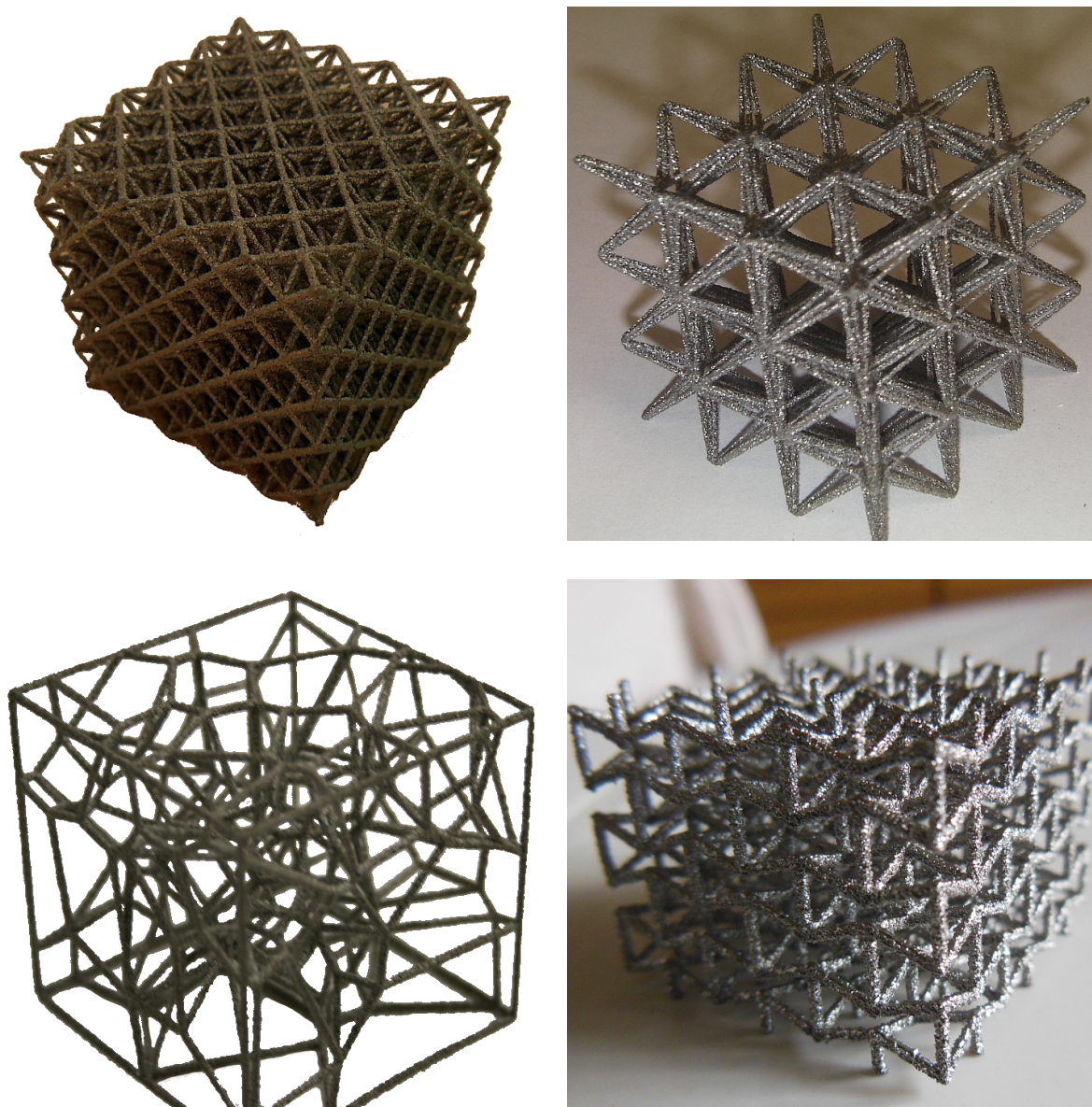


FIGURE 2.7 – Structures cellulaires périodiques et aléatoires (en bas à gauche) réalisées en Ti6Al4V sur notre moyen EBM (les diamètres des poutres sont compris entre 0,6 et 1 mm)

au-dessus des autres. Dans un tel cas, pour chaque couche, la source d'énergie vient fondre la poudre et refondre une partie des couches inférieures. On a donc une bonne intégrité de la matière et peu ou pas de porosités. La réalisation de surfaces en porte-à-faux (voir glossaire) est plus complexe. Les volumes fondus ne sont alors plus en contact avec des volumes de pièce denses et il est possible qu'ils s'effondrent dans le lit de poudre ou que le système de dépose de la poudre les déplace. D'autre part, la différence importante de conductivité thermique entre matière fondue et poudre peut conduire à une accumulation d'énergie dans ces zones fondues et provoquer des déformations thermiques (Figure 2.9).

Afin de pallier les déformations thermiques constatées au niveau de surfaces en porte-à-faux, des structures peuvent être placées dans ces zones lors de la phase de préparation



FIGURE 2.8 – Sept sphères évidées et imbriquées les unes dans les autres réalisées par notre moyen EBM

de la fabrication. Ces structures, appelées supports, sont fabriquées à partir du même matériau, avec des paramètres de fusion dégradés en EBM (Figure 2.10). Elles permettent de mieux conduire la chaleur de la zone de fusion jusqu'à la structure de la machine par rapport à la poudre non fondue. Leur but est également d'augmenter la rigidité des zones en porte-à-faux. La déformation thermique en cours de fabrication est ainsi limitée. Dans ce cas de figure, la pièce étant contrainte par les supports lors de la réalisation, des contraintes résiduelles peuvent persister une fois le refroidissement effectué. Il faut alors, et c'est essentiellement le cas en LBM, effectuer un recuit de relaxation. Les supports sont soit séparés à l'issue de la fabrication, soit intégrés à la conception de la pièce.

L'utilisation de supports est problématique à plusieurs titres. Tout d'abord, leur fabrication consomme de la matière première et de l'énergie. De plus, les durées de la phase de préparation et de fabrication sont toutes deux augmentées par leur présence. Enfin, leur séparation à l'issue de la fabrication peut être complexe et longue, notamment lorsque les supports se trouvent à l'intérieur de volumes peu accessibles, comme des tubes. Tous ces éléments montrent que les supports ont un coût non négligeable. Par ailleurs, ces structures ont un impact sur la qualité de surface puisque leur séparation s'apparente, localement, à un arrachement qui peut faire apparaître un faciès de rupture très rugueux.

Cet aspect thermique impacte donc grandement la phase de fabrication. Par conséquent, c'est une contrainte qui va beaucoup guider la conception du produit, à la fois par l'intégration des supports (enlevables ou non) et par la conception des formes de la pièce pour minimiser la quantité de supports, avec une bonne orientation.

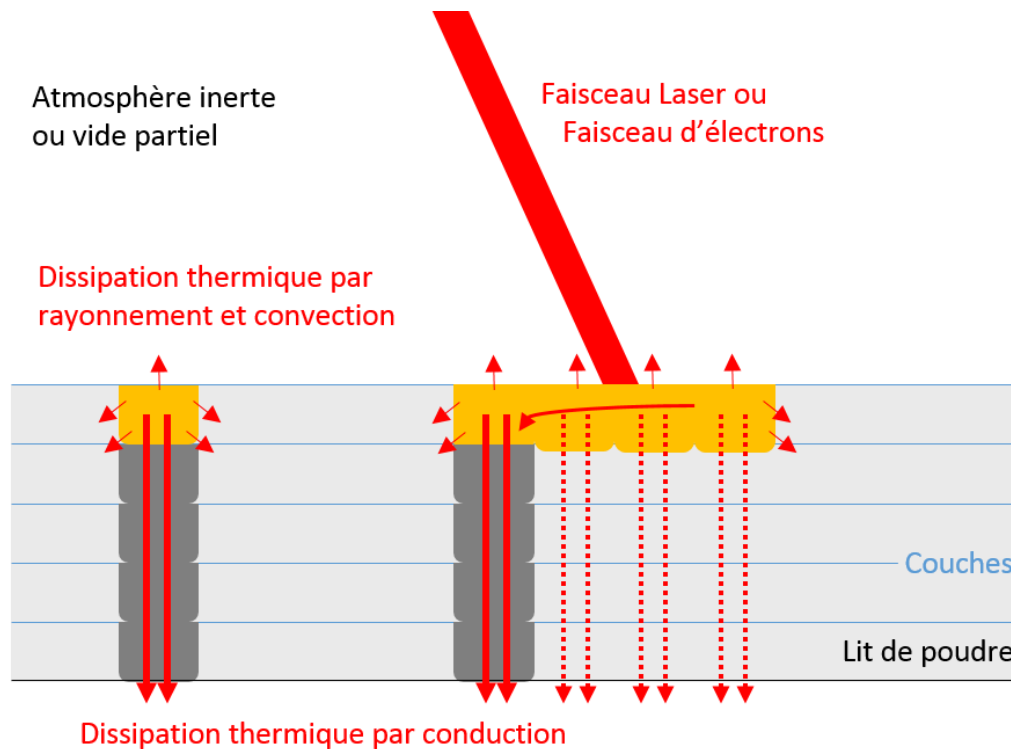


FIGURE 2.9 – Fabrication par LBM ou EBM d'un voile mince vertical (à gauche) et d'une pièce avec un volume en porte-à-faux (à droite) ; les flèches rouges montrent le bilan d'énergie ; la réalisation de la pièce de droite conduit à une accumulation d'énergie du fait de la faible conduction de la poudre non liée par rapport au matériau dense

2.3.3 Récupération de la poudre non liée

En fin de fabrication, les pièces sont contenues dans l'enceinte de la machine, dans un volume de poudre non fondue. Suivant le procédé considéré, les particules de poudre non fondue sont soit libres, soit consolidées. Dans les deux cas, il est nécessaire d'extraire les pièces de leur gangue et d'enlever les particules de poudre qu'elles peuvent contenir pour réutiliser la matière non fondue. Il peut être par ailleurs important d'éviter la dissémination de la poudre pour certains types de pièces, comme les implants médicaux et les pièces aérospatiales. Une pièce relâchant de la poudre en fonctionnement peut, en effet, causer des problèmes sanitaires pour une prothèse ou causer des défaillances dans un mécanisme. Il existe différents procédés permettant de réaliser le dépoudrage. Les procédés LBM utilisent un système d'aspiration afin de réaliser la première opération de dépoudrage. Le procédé EBM, pour lequel la poudre non fondue est consolidée, fait intervenir un système s'apparentant au sablage afin de casser les liaisons. Pour ces deux opérations, les volumes à dépoudrer doivent être accessibles. Suivant les profondeurs de ces volumes, des opérations supplémentaires peuvent être requises.

Pour les applications ne tolérant pas la présence, même minime, de dissémination de poudre susceptible de se détacher des pièces, il est nécessaire d'effectuer des opérations supplémentaires. En effet, les surfaces extérieures des pièces présentent des particules de poudre partiellement fondues (Figure 2.11). Deux types de procédés existent actuellement

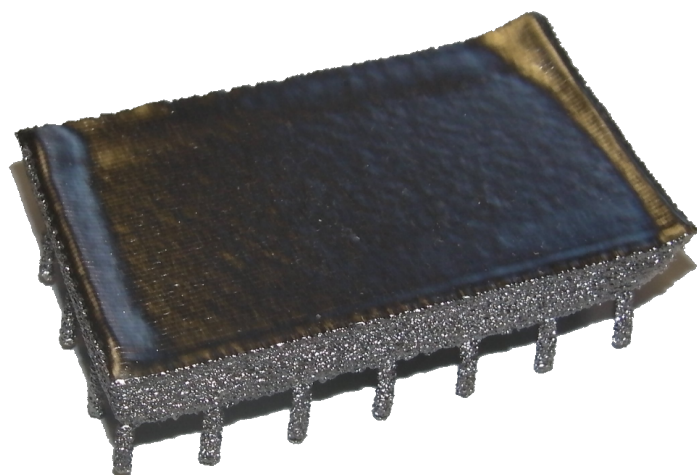


FIGURE 2.10 – Pièce parallélépipédique, réalisée par notre moyen EBM, présentant des déformations géométriques à cause du trop faible nombre de supports (structures cylindriques sous la pièce)

pour les enlever : les procédés abrasifs tels le sablage ou micro-billage et les procédés chimiques consistant à effectuer une attaque chimique qui va ronger les surfaces et détacher les particules collées. Quels que soient les moyens de fabrication et de dépoudrage considérés, la problématique du dépoudrage doit être prise en compte lors de la conception. Il est essentiel d'assurer l'accessibilité des volumes à dépoudrer (pas de volumes creux fermés par exemple) ou de créer des ouvertures pour cette phase. Nous reviendrons plus en détail sur cette contrainte et notamment sur la caractérisation du domaine d'enlèvement de poudre en EBM.

2.3.4 Qualité surfacique et dimensionnelle

Les procédés additifs métalliques ont la réputation d'offrir des pièces avec de fortes rugosités. Comme le montre la figure 2.11, des particules de poudre non fondue se collent à la zone de fusion lors de la réalisation des pièces. Les valeurs de rugosité arithmétique se situent généralement entre 10 et 35 μm et sont plus élevées que ce qui est habituellement obtenu par usinage. Des opérations de finition sont donc nécessaires pour générer des états de surfaces de l'ordre de grandeur de ceux obtenus avec des moyens d'usinage. Ponctuellement, les rugosités importantes peuvent être bénéfiques, notamment quand on souhaite maximiser les surfaces d'échanges. Concernant les incertitudes dimensionnelles, les valeurs communiquées par les constructeurs sont comprises entre 0,1 mm (SLS, DMLS et LBM pour une distance de 100 mm) et 0,2 mm pour le moyen EBM (dans les mêmes conditions).

Il est nécessaire de vérifier la compatibilité entre ces qualités de surface et dimensionnelles avec les exigences géométriques du cahier des charges fonctionnel. Il faut aussi prendre en compte la problématique de rupture par fatigue qui peut se poser au vu des nombreuses amorces de fissures observables sur la micro-géométrie (Figure 2.11). Si les spécifications ne peuvent être atteintes, les opérations de finition doivent être prévues dès

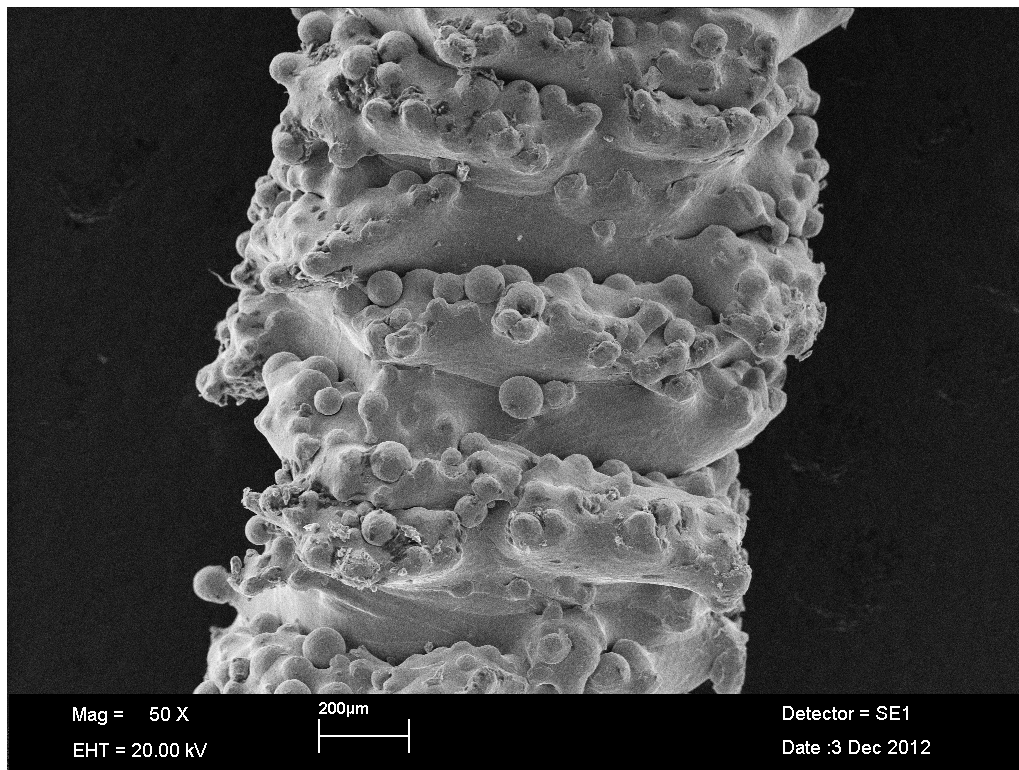


FIGURE 2.11 – Poutre cylindrique de 1 mm de diamètre, réalisée en Ti6Al4V par notre moyen EBM, observée à l'aide d'un microscope électronique à balayage

la phase de conception.

2.3.5 Matériaux disponibles

Les procédés de fabrication additive mettent en jeu des phénomènes physiques différents des moyens conventionnels. Par conséquent, l'utilisation de certains matériaux dans les procédés additifs peut poser des problèmes du même type qu'une coupe difficile en usinage ou une mauvaise coulabilité en moulage. Les alliages de Titane, par exemple, ne s'usinent pas facilement [BSI⁺10], alors qu'ils sont très utilisés en LBM et EBM. De nombreux matériaux présentant d'excellentes propriétés mécaniques (Titane pur, TiAl, Ti6Al4V, Aluminium-Lithium, etc), des résistances élevées à la corrosion (Inconels par exemple) ou des coefficients de dilatation thermique très faibles comme l'Invar, peuvent être utilisés en fabrication additive. La grande facilité d'emploi de ces matériaux, généralement qualifiés de "techniques" à cause de leur coût élevé et de leur emploi complexe dans des moyens conventionnels, offre une liberté au concepteur qui peut choisir des matériaux en dehors des aciers et des alliages d'aluminium usuels.

Le choix des matériaux peut malgré tout être une contrainte lorsque les jeux de paramètres n'ont pas été mis au point pour ce matériau. En effet, ce type de procédé possède de nombreux paramètres qui influent sur le phénomène de fusion. Il est difficile de qualifier un nouveau matériau en garantissant une matière saine et des propriétés répondant aux normes. Les conditions de fabrication, en particulier, peuvent poser problème en termes

de stabilité de la composition métallurgique des poudres d'alliages.

La fusion d'alliages de métaux avec des points de fusion très différents peut poser la question de l'évaporation du métal ayant le point de fusion le plus faible. Le catalogue des matériaux disponibles est donc parfois limité en ce qui concerne les aciers et les alliages d'aluminium (selon les procédés et les fabricants de machines). De plus, certains fabricants empêchent l'utilisation de matériaux non qualifiés sur leurs machines.

D'autre part, la maîtrise des propriétés de la source d'énergie qu'offrent les procédés par couches devrait permettre d'affiner le type de liaison réalisée, qu'il s'agisse de fusion locale, de fusion partielle ou d'une consolidation s'apparentant à du frittage. Le procédé EBM exploite d'ores et déjà cette propriété puisque le faisceau d'électrons lie partiellement la poudre lors de la mise à température de chaque couche et réalise des opérations de fusion lors de la fabrication des pièces. La maîtrise des paramètres de fusion et de l'historique thermique des différents volumes d'une pièce devrait par ailleurs permettre de prédire le type de microstructure en tout point de la pièce. A terme, il sera vraisemblablement possible de modifier localement les propriétés du matériau d'une pièce.

Ces changements importants au niveau du type de matériaux utilisables, ainsi que des possibilités concernant la réalisation de gradients de propriétés de matériaux au sein des pièces, modifient le domaine des possibles dans la conception de produits.

2.4 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que les procédés additifs en couches permettent de réaliser des formes difficilement voire non fabricables, avec des procédés conventionnels. Les nouvelles libertés de conception sont les suivantes :

- le peu de déformations engendrées, si la thermique du procédé est maîtrisée, et la petite taille de la zone de fusion lors de la mise en forme, permettent la fabrication de pièces de faible épaisseur et de grandes dimensions.
- l'accès à l'intégralité du volume de fabrication autorise la réalisation de pièces complexes, et notamment l'obtention de surfaces en contre-dépouille. De plus, la phase de préparation de la fabrication n'est pas impactée par la complexité des volumes réalisés.
- l'utilisation conjointe de la grande accessibilité et de la petite taille de fusion permet la réalisation de structures légères, tels les treillis tridimensionnels, et la fabrication de matériaux architecturés.
- l'accessibilité permet également la superposition des volumes fondus suivant l'axe vertical. Cette propriété peut être utilisée pour empiler les pièces afin d'améliorer la productivité du moyen ou pour réaliser des pièces imbriquées les unes dans les autres et ainsi produire des mécanismes qui ne nécessitent pas d'assemblage ultérieur.

Nous avons identifié trois principales contraintes de fabrication :

- la fabricabilité dépend principalement de phénomènes thermiques qui engendrent des déformations pouvant conduire à des non-conformités ou à l'interruption de la fabrication.
- la qualité dimensionnelle, géométrique et surfacique des pièces est moins bonne que ce qui est habituellement obtenu par usinage. Les surfaces fonctionnelles peuvent nécessiter des opérations de finition, si de faibles rugosités sont spécifiées par exemple.

- une fois les pièces fabriquées, il est nécessaire de récupérer la poudre non fondue pour pouvoir retirer la pièce et réutiliser la poudre. Il faut donc prendre en compte cette opération lors de la conception. L'utilisation des procédés de dépoudrage classiques n'est pas suffisante pour enlever toutes les particules de poudre et notamment celles collées aux surfaces. Pour parvenir à ce résultat, d'autres procédés doivent être utilisés.

Enfin, la liste des matériaux utilisables est différente de ce que l'on rencontre classiquement en fabrication mécanique. Les aciers et alliages d'aluminium ne représentent qu'une très faible partie de la production, alors que les alliages de Titane et les super alliages sont très présents. Il s'agit là d'une contrainte puisque tous les matériaux ne sont pas disponibles et que le concepteur doit changer ses habitudes, mais il s'agit surtout d'une liberté de conception grâce à l'accès facile à des matériaux très techniques en bénéficiant d'une fabrication aisée. Cette opportunité permet la conception de pièces plus légères, ou plus à même de répondre aux besoins exprimés dans un cahier des charges fonctionnel.

La prise en compte du nouveau domaine des possibles que nous venons de dessiner, nécessite la caractérisation des différentes contraintes de fabrication notées dans ce chapitre. Ces contraintes permettront d'établir des règles qui pourront être utilisées au sein d'une démarche de conception. Vues les différences importantes qui existent entre les procédés additifs en couches, la caractérisation des contraintes sera menée pour le procédé de fabrication EBM dont nous disposons au laboratoire.

Chapitre 3

Facteurs influençant la conception des produits fabriqués par EBM

3.1 Introduction

Nous avons vu précédemment que les procédés de fabrication additive font évoluer le domaine des possibles en conception de produits. Cette évolution est due à l'apparition de nouvelles libertés de conception et de nouvelles contraintes de fabrication. Afin de tenir compte de cette évolution, les phénomènes qui ont lieu durant la fabrication doivent être explicités pour être pris en compte lors de la conception des pièces. Ces phénomènes variant d'un procédé à l'autre, nous nous intéresserons dans ce chapitre à leur définition et à leur caractérisation pour le procédé de fusion par faisceau d'électrons EBM.

Dans un premier temps, nous présenterons en détail le procédé EBM, en insistant sur ses particularités par rapport aux autres procédés additifs métalliques en poudre. Dans une deuxième partie, nous caractériserons les différents facteurs influents par une démarche expérimentale. Nous verrons ensuite quels sont les paramètres qui impactent la durée de fabrication et le coût de revient des pièces. Nous conclurons enfin sur l'intérêt de cette caractérisation et sur la manière de l'utiliser efficacement en conception.

3.2 Le procédé EBM

Le procédé de fusion par faisceau d'électrons EBM est un procédé de fabrication additive en couches, dédié à la réalisation de pièces en alliages métalliques. Sa particularité la plus évidente est l'utilisation d'un faisceau d'électrons comme source d'énergie au lieu d'un faisceau Laser. Le faisceau d'électrons est généré dans un canon à électrons par excitation d'un filament en Tungstène. Les électrons sont ensuite accélérés par un champ électrique et passent dans une colonne où ils sont déviés par des bobines magnétiques afin de contrôler la position, la focalisation et la forme du faisceau (Figure 3.1). Cette source d'énergie spécifique impose une fabrication sous vide et la consolidation du lit de poudre. Ces deux aspects ont des incidences favorables et défavorables sur la fabrication de pièces.

Paramètres de la source d'énergie L'utilisation d'un canon à électrons permet de maîtriser un grand nombre de paramètres. Il est ainsi possible de faire varier la puissance et le diamètre du faisceau d'électrons. D'autre part, le pilotage du faisceau étant réalisé par des bobines et non par des éléments mécaniques, la vitesse de déplacement peut être très élevée (jusqu'à 8000 m/s). Cette vitesse de déplacement permet d'avoir plusieurs zones de fusion simultanément (en bombardant rapidement plusieurs zones). L'intérêt d'une forte puissance couplée à la maîtrise fine de tous les paramètres, réside dans la grande vitesse de réalisation des pièces, ainsi que dans la possibilité de contrôler précisément la fusion. La durée de réalisation rapide des couches est également un gage de faibles variations thermiques au sein des différentes couches.

Vide secondaire L'utilisation d'un canon à électrons impose un vide poussé pour éviter les interactions entre les molécules de gaz et les électrons. Une pression inférieure à $5 \cdot 10^{-7}$ bar dans l'enceinte de fabrication est nécessaire avant de mettre sous énergie le canon à électrons. Lors de la mise sous énergie, et durant toute l'utilisation du canon à électrons, de l'Hélium est injecté en continu pour maintenir une pression constante

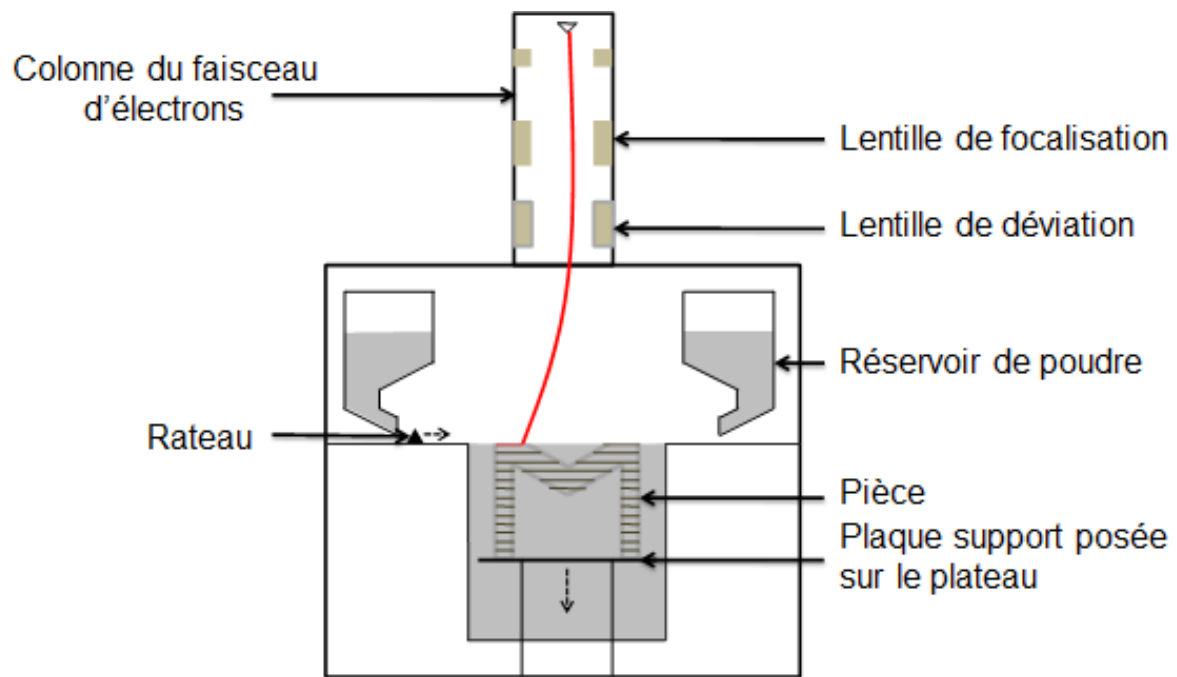


FIGURE 3.1 – Représentation schématique d'une machine EBM

($2 \cdot 10^{-5}$ bar). La présence de vide permet de limiter la pollution de la poudre et de la pièce par des gaz comme l'Oxygène, l'Azote, etc. Cette propriété est particulièrement intéressante lorsque les matériaux utilisés sont réactifs, comme c'est le cas des alliages de Titane par exemple. Le vide poussé permet, en outre, de rendre négligeables les pertes de chaleur par convection.

Consolidation du lit de poudre L'emploi d'un flux d'électrons charge électriquement le lit de poudre. Pour éviter les projections dues à la répulsion électrostatique de particules de poudre adjacentes, le lit de poudre doit être consolidé. Cette consolidation, parfois considérée comme un pré-frittage, est effectuée par balayage du faisceau d'électrons avec des densités d'énergie inférieures à la phase de fusion. Cette consolidation a des effets favorables, car elle limite la quantité de supports nécessaires, mais complexifie l'opération de dépoudrage, comme nous le verrons ultérieurement.

Préchauffe du lit de poudre Nous avons vu que la consolidation est effectuée par le faisceau d'électrons. Elle est obtenue par la montée en température du lit de poudre (environ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les alliages de Titane). Cette préchauffe importante permet de réduire le gradient thermique dans le volume de fabrication et au sein de la pièce, entre volumes consolidés et zones de fusion.

Poudres métalliques Le procédé EBM met en œuvre des poudres dont la granulométrie est comprise entre 40 et $120\text{ }\mu\text{m}$, avec une valeur moyenne que nous avons mesurée à environ $70\text{ }\mu\text{m}$ (Figure 3.2). Cette taille de particules permet, comme l'indique le constructeur, de manipuler la poudre sans risque d'explosion, en particulier lors de la phase de

dépoudrage qui peut être dangereuse avec des poudres plus fines. L'utilisation de poudre dont la granulométrie est supérieure à la plupart des autres procédés additifs métalliques a toutefois des conséquences négatives, en ce qui concerne la qualité des surfaces réalisées. En effet, la taille des particules est un des facteurs qui impacte la rugosité. Une granulométrie importante dégrade la qualité de surface par rapport aux moyens qui mettent en oeuvre des poudres plus fines (on retrouve des granulométries de 10 à 40 μm en LBM).

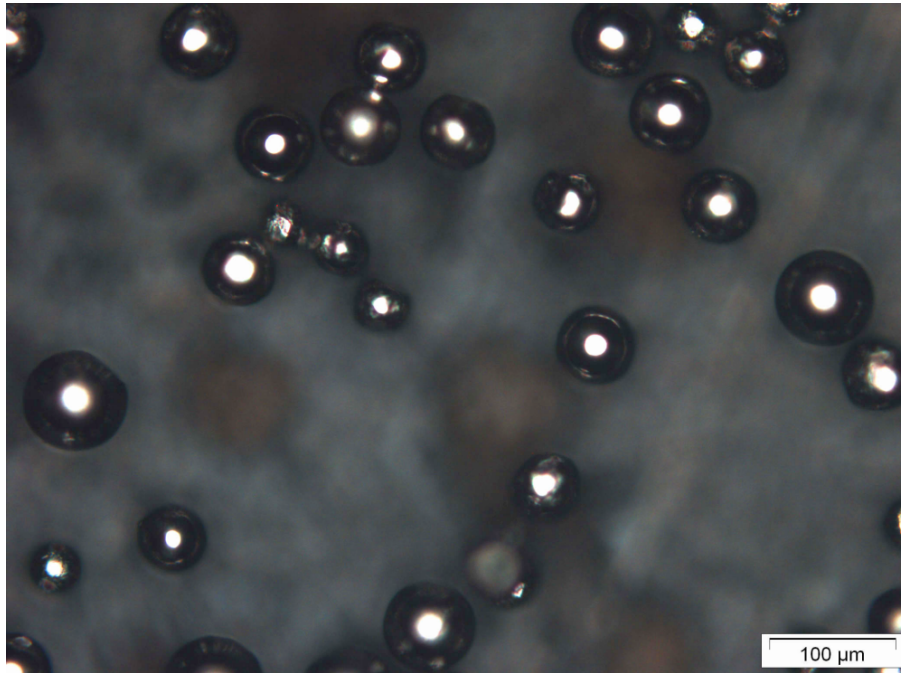


FIGURE 3.2 – Particules de poudre de Ti6Al4V neuve observées par microscopie optique

3.3 Détermination expérimentale des facteurs qui influent sur la conception des produits fabriqués par la technologie EBM

Les particularités du procédé évoquées précédemment induisent des phénomènes qu'il est important de prendre en compte lors de la conception, puisqu'ils influent sur la fabricabilité et la qualité des pièces. Pour cela, il est nécessaire de les identifier et de les caractériser. Nous avons effectué cette phase de caractérisation expérimentale à partir de pièces réalisées par le moyen EBM du laboratoire (une machine A1 de la société Arcam).

3.3.1 Identification des facteurs influents

La conception de produits destinés à être réalisés par le moyen de fabrication EBM doit prendre en compte les caractéristiques physiques de la machine, qu'il s'agisse des dimensions maximales des pièces réalisables ou de la dimension minimale des entités géométriques.

Par ailleurs, d'autres contraintes sont liées à la nécessité de consolider le lit de poudre, à chaque couche, pour éviter la projection de poudre par le faisceau d'électrons, stabiliser le bain de fusion et améliorer la dissipation thermique. Du fait de la cohésion présente entre les particules de poudre consolidée, l'opération de dépoudrage est plus complexe qu'une simple aspiration de poudre non consolidée et constitue un facteur devant être considéré.

D'autre part, le procédé EBM se distingue des autres procédés additifs en lit de poudre par la forte puissance de la source d'énergie employée et par une préchauffe importante du lit de poudre. De grandes quantités d'énergie sont ainsi apportées rapidement à chaque couche. La dissipation thermique étant faible, la problématique thermique a une grande importance pour la fabricabilité des pièces.

Enfin, la qualité des pièces que réalise le procédé détermine les opérations de finition et influence la conception de la pièce pour répondre aux exigences du cahier des charges.

3.3.2 Caractéristiques de la machine

Le premier facteur identifié concerne les caractéristiques de la machine. Nous distinguons les dimensions du volume de fabrication, qui conditionnent les dimensions maximales des pièces réalisables, et les dimensions fabricables minimales des entités géométriques.

Volume fabricable Il faut prendre en compte, lors de la conception d'un produit, les dimensions maximales des pièces qu'il est possible de réaliser sur une machine de production. Si les procédés conventionnels offrent aujourd'hui de très nombreuses possibilités concernant les différentes tailles de machine, les dimensions des machines de fabrication additive sont généralement limitées. Dans le cas du procédé EBM, trois machines sont actuellement commercialisées par la société Arcam [AB14] (Q10, A2XX et Q20) et quatre autres modèles, désormais retirés de la vente, sont toujours largement utilisés (S12, A1, A2 et A2X). Ces différents modèles offrent trois possibilités en ce qui concerne les dimensions maximales fabricables :

- les modèles présentant les dimensions les plus faibles (S12, A1 et Q10) ont un volume de fabrication maximal de 200 mm * 200 mm * 190 mm.
- il existe des modèles dédiés à la réalisation de pièces plus hautes (A2, A2X) 200 mm * 200 mm * 350 mm.
- enfin, deux modèles offrent des dimensions supérieures avec un volume de fabrication cylindrique de 380 mm de diamètre et de 350 mm de haut (A2XX et Q20).

Les dimensions du volume de fabrication maximal doivent lui permettre de contenir l'intégralité de la pièce à réaliser. Dans certains cas, ce facteur peut conduire à une orientation particulière de la pièce à fabriquer, comme illustré sur la figure 3.3. L'impact sur l'occupation du volume de fabrication est important, ce qui complexifie la gestion de la production et retentit sur les coûts.

Dimensions minimales Nous avons vu précédemment que les procédés additifs métalliques et le procédé EBM en particulier, offrent de nouvelles opportunités en ce qui concerne la fabrication de structures légères et de géométries fines. Il est donc important de connaître les dimensions minimales réalisables. Ces dimensions dépendent de la forme

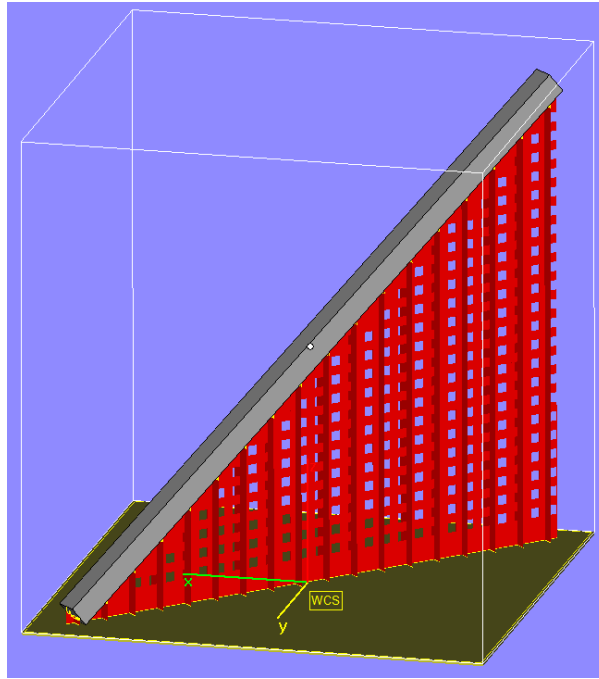


FIGURE 3.3 – Balançage d’une pièce prismatique (avec ses supports, en rouge) de section carrée de 10 mm et de 290 mm de longueur fabriquée dans un volume de 200 mm * 200 mm * 190 mm

de la zone fondue dans le plan horizontal et suivant l’axe vertical. Le constructeur communique sur une dimension minimale réalisable de 0,6 mm dans le plan de balayage de la source d’énergie et d’environ 0,075 mm verticalement.

L’observation par tomographie à rayons X de poutres de faibles diamètres, fabriquées sur notre machine, a montré une grande variation dimensionnelle (Figure 3.4). La taille des sections varie et présente parfois une anisotropie dans le plan (sections ovales) qui peut être causée par le passage du râtelier. La présence de particules de poudre collées à la pièce complexifie la détermination de la taille des sections. Nous avons mesuré des dimensions de sections inférieures à la dimension demandée (0,6 mm), avec des valeurs mesurées comprises entre 0,3 mm et 0,5 mm. A cette échelle, la rugosité importante impacte considérablement les dimensions réelles des entités géométriques de faible épaisseur. La fabrication de poutres dans le plan (X,Y) de la machine devrait permettre d’atteindre de très faibles dimensions en épaisseur (suivant l’axe Z machine) de l’ordre de grandeur d’une couche de poudre. On se heurte alors aux limites de résistance de la poutre fabriquée, qui ne résiste pas à l’opération de dépoudrage. Afin de prendre en compte ce phénomène, nous considérerons que les dimensions minimales réalisables sont de 0,6 mm dans toutes les directions.

3.3.3 Dépoudrage

Dépoudrage en EBM Après réalisation des pièces en EBM, l’opération de dépoudrage demande une attention particulière à cause de la consolidation de la poudre non fondue. Une fois les pièces produites, elles sont contenues dans un bloc de poudre consolidée

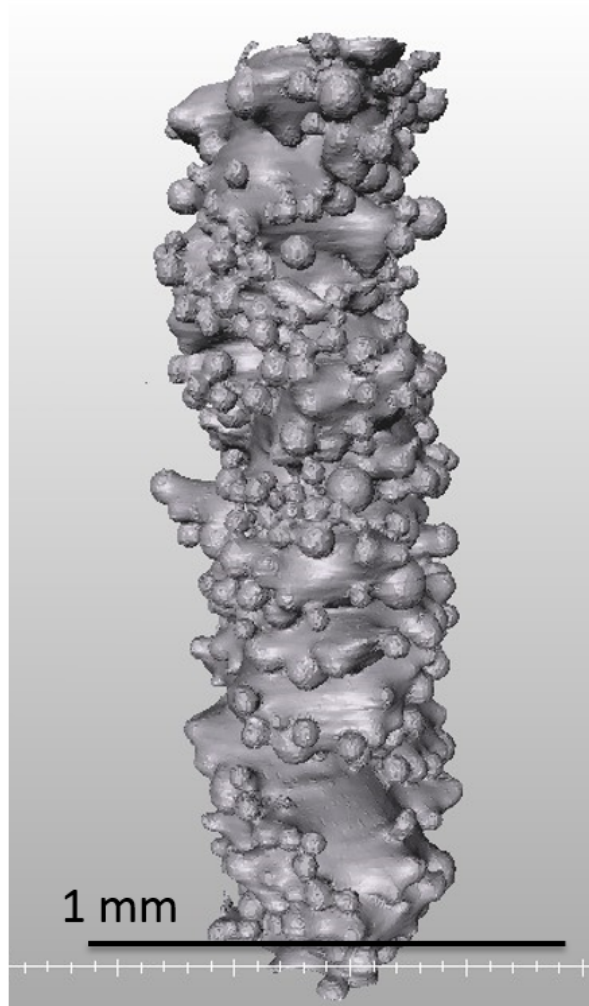


FIGURE 3.4 – Image obtenue par tomographie à rayons X d’une poutre verticale dont le diamètre nominal est 0,6 mm

qui ne peut être récupéré par aspiration comme c’est généralement le cas en LBM. En effet, casser les liaisons entre les particules de poudre (Figure 3.5) nécessite soit une opération mécanique, soit une opération chimique. Le recyclage aisé, après collecte de la poudre non fondue, exige que celle-ci ne soit pas polluée. Il faut donc autant que possible éviter les attaques chimiques. La solution prescrite par le constructeur consiste à utiliser le *Powder Recovery System* (PRS), une cabine de sablage étanche employant la même poudre d’alliage et permettant de filtrer les particules fines afin de conserver la même distribution dans la granulométrie de la poudre. Cet appareil permet, en outre, la réutilisation de la poudre consolidée après tamisage, car les liaisons entre les particules de poudre sont cassées par la projection de particules portées par un flux d’air.

Paramètres influents Le résultat de l’opération de dépoudrage dépend de plusieurs paramètres : les réglages du système de dépoudrage, le mode opératoire adopté, les propriétés de la poudre consolidée (matériau, consolidation, granulométrie) et la géométrie

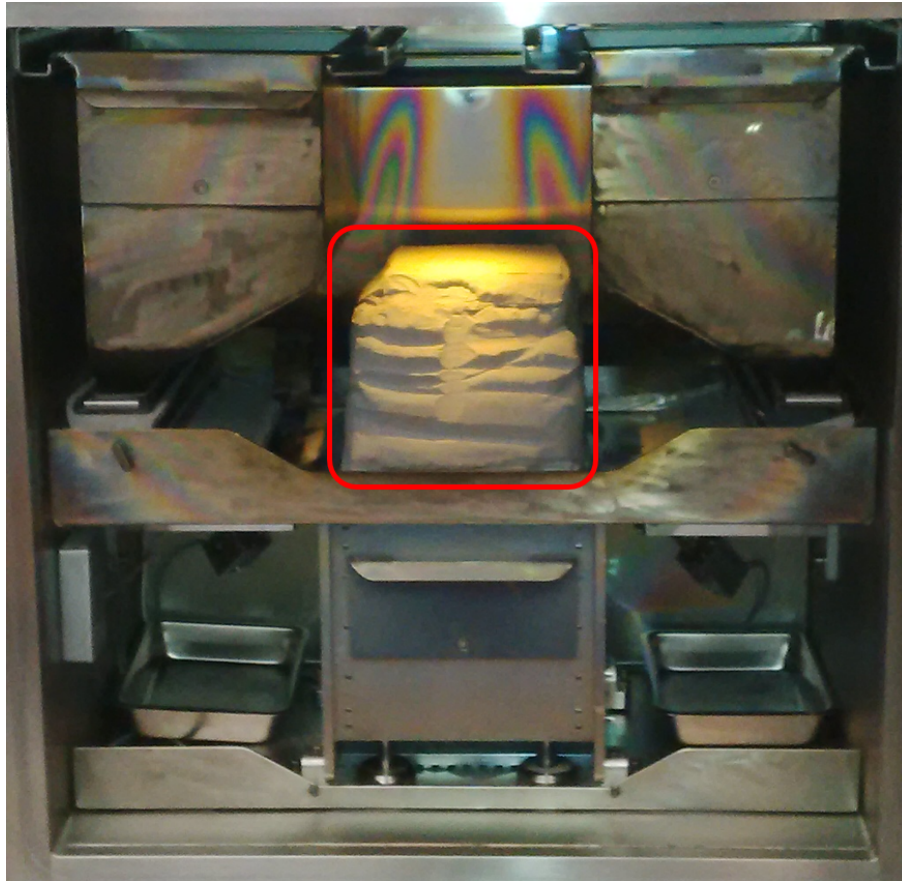


FIGURE 3.5 – Volume de poudre consolidée (encadré en rouge) contenant les pièces réalisées à l’issue de la fabrication dans l’enceinte de notre machine

des volumes à dépoudrer. Les propriétés de la poudre consolidée dépendent de l’alliage utilisé, ainsi que des conditions de réalisation de la consolidation. Nous avons mené des campagnes d’essais pour caractériser la dépoudrabilité. Nous utilisons le système PRS pour lequel les réglages effectués et le mode opératoire suivi sont explicités ci-après. Le matériau utilisé est l’alliage Ti6Al4V avec les paramètres de consolidation standard préconisés par le fabricant. Concernant la géométrie de la pièce, deux cas seront étudiés : celui des treillis et celui des trous borgnes ou débouchants.

Réglage du système de récupération de la poudre Le PRS dispose seulement du réglage de la pression d’air comprimé, les débits d’air et de particules portées par le flux d’air comprimé étant réglés par le constructeur. Le réglage de la pression permet de s’adapter au dépoudrage de structures fines. Effectué à pression élevée, ce dépoudrage conduit parfois à l’arrachement de poutres.

Protocole expérimental de dépoudrage L’opération de dépoudrage est effectuée manuellement par l’opérateur. Celui-ci utilise un pistolet projetant les particules de poudre sous un flux d’air comprimé. La buse du pistolet est déplacée avec de légères oscillations afin de faciliter la circulation du flux d’air et de poudre. Lors des expériences

menées, la buse a été placée à quelques centimètres des volumes à dépoudrer pendant une durée fixe (3 minutes). La pression du PRS a été réglée à sa valeur maximale (6 bars).

Impact de la durée L'opérateur s'arrête lorsque la pièce est entièrement dépoudrée. La durée de l'opération dépend du nombre et de la géométrie des pièces présentes dans le volume de poudre consolidée. Dans le cadre de notre démarche expérimentale, nous nous sommes intéressés à l'impact de la durée de dépoudrage sur la quantité de poudre déconsolidée et enlevée dans des trous cylindriques, notamment pour fixer la durée de référence pour les expériences suivantes.

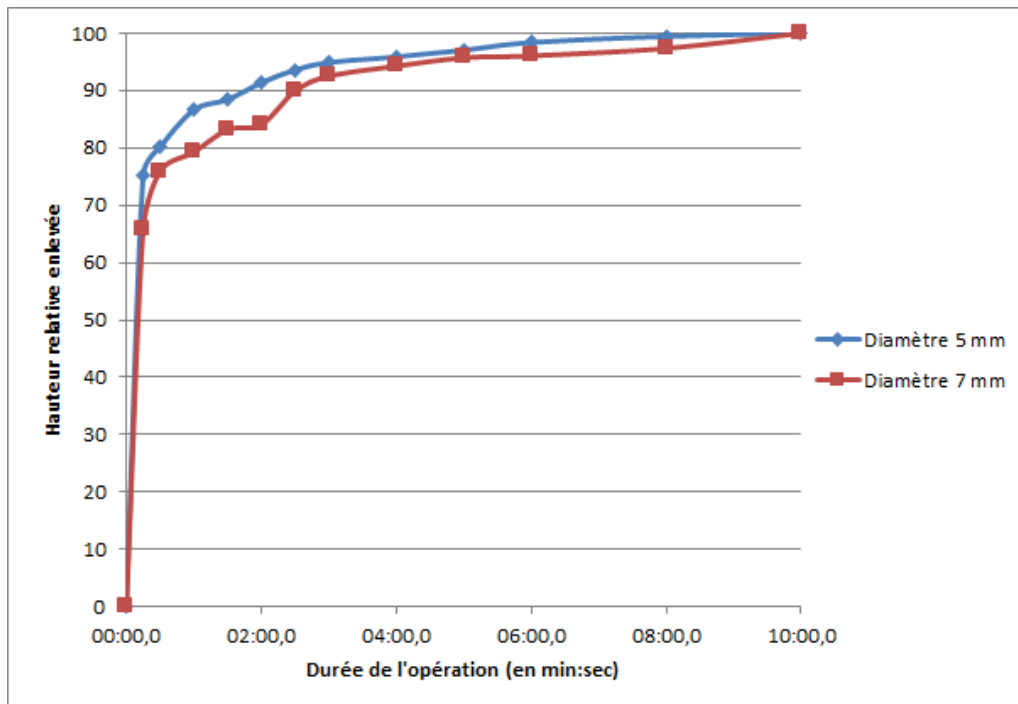


FIGURE 3.6 – Evolution de la hauteur relative de poudre enlevée en fonction du temps (en minutes : secondes) dans des trous borgnes de diamètre 5 et 7 mm

Afin de pouvoir quantifier le volume de poudre enlevée, nous avons réalisé plusieurs trous borgnes de diamètres de 5 et 7 mm. L'intérieur de ces trous cylindriques a ensuite été dépoudré avec le PRS, selon le mode opératoire décrit précédemment. Nous avons mesuré les hauteurs de poudre enlevée au milieu des volumes cylindriques. La figure 3.6 montre l'évolution relative de la hauteur dépoudrée en fonction du temps. Entre 75% et 80% du volume dépoudrable est enlevé durant les trente premières secondes de l'opération. Enlever 95% de la poudre dure de trois à quatre minutes et l'essentiel (98%) du volume de poudre qu'il est possible d'enlever est retiré au bout de six minutes.

La majorité de la poudre est enlevée dès les premières secondes de l'opération. Pour la suite de la démarche expérimentale, nous avons fixé la durée de l'opération de dépoudrage à trois minutes afin de maintenir un écart de mesure relativement faible par rapport à la valeur asymptotique (inférieure à 10%) tout en minimisant la durée des expériences.

Répétabilité Afin d'estimer l'incertitude de mesure, nous avons quantifié la répétabilité de l'opération de dépoudrage pour des volumes cylindriques. Pour cela, nous avons effectué la même opération de dépoudrage sur trente et cinquante cylindres creux de diamètres 5 et 7 mm (Figure 3.7). Les pièces ont été réalisées à partir de poudre de Ti6Al4V en couches de 50 μm en utilisant les paramètres de fabrication proposés par le fabricant.

Les hauteurs de poudre mesurées varient respectivement de 2,7 et 2,1 mm pour les cylindres de 5 et 7 mm de diamètre (ce qui correspond à une incertitude relative de 25 et 15%). Ces dispersions peuvent s'expliquer par des variations de la méthodologie de dépoudrage par l'opérateur, des variations de mesure, mais aussi par la forme irrégulière de la surface de poudre consolidée. Dans la suite de la phase expérimentale, les expériences et les mesures seront répétées plusieurs fois et nous utiliserons les résultats moyennés.

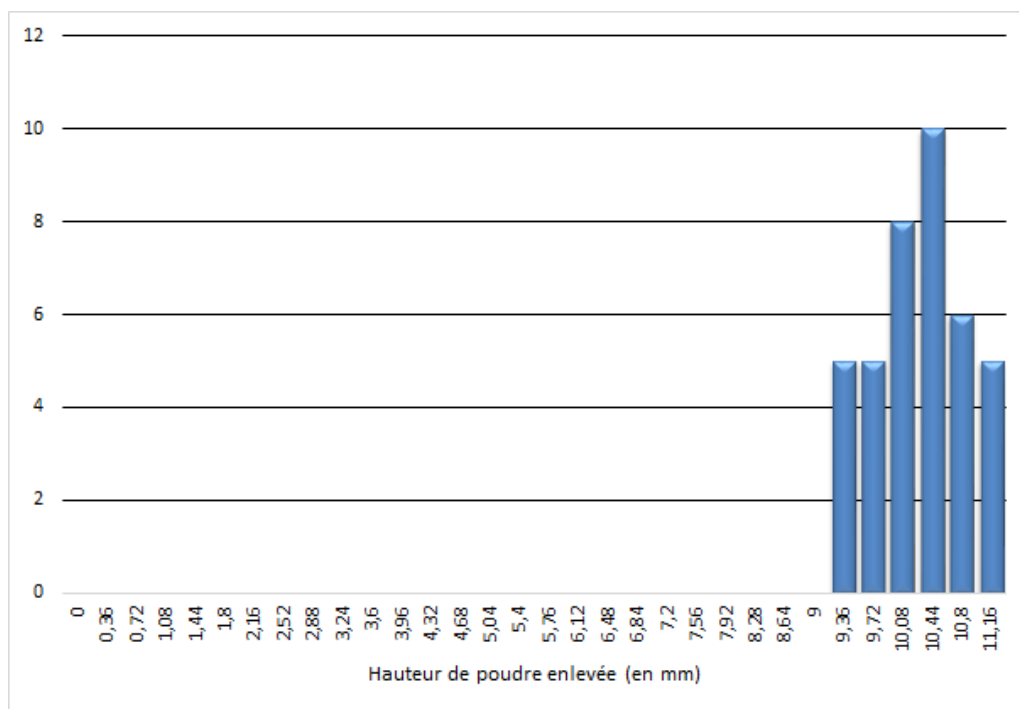


FIGURE 3.7 – Distribution des mesures de hauteurs de poudre enlevée (en mm) à l'intérieur de cylindres de diamètre 5 mm

Dépoudrage de treillis Nous avons vu qu'il est aisé de réaliser des structures légères tels les treillis. Ces structures posent des problèmes lors de l'opération de dépoudrage lorsque leur épaisseur est importante et que la densité est élevée. C'est notamment le cas pour la pièce composée de plusieurs sphères que nous avons mentionnée au chapitre précédent (Figure 2.8). Il n'est pas possible d'enlever l'intégralité de la poudre qu'elle contient avec le système PRS.

Nous avons réalisé plusieurs pièces avec des trous de section carrée de 20 mm de coté (et de 50 mm de long) contenant des treillis avec un motif "diamant" d'une densité de 20% (Figure 3.8). Contrairement aux pièces sans treillis qui sont entièrement dépoudrables, la quantité de poudre enlevée de ces pièces dépend du paramètre de maille des treillis (Figure

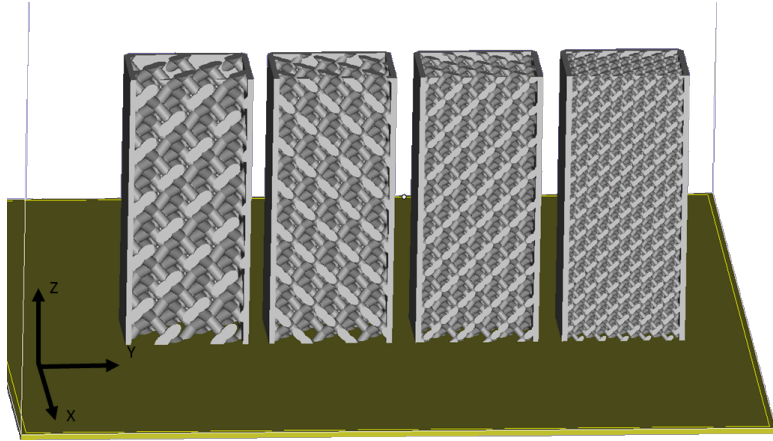


FIGURE 3.8 – Vue en coupe de pièces parallélépipédiques contenant des treillis avec un motif diamant (20% de densité) et un paramètre de maille de 10, 8, 6 et 4 mm (de gauche à droite)

3.9). Plus celui-ci est grand, plus l'enlèvement est efficace. Du fait de la grande variété de densité et de forme des structures cellulaires, ainsi que de la difficulté à mesurer la hauteur de poudre dépoudrée, il serait intéressant d'étudier l'impact des structures légères sur la perte de charge du flux d'air. Il serait alors possible de proposer un modèle de dépoudrage pour déterminer la quantité de poudre enlevable, pour un type de treillis donné.

Dépoudrage de trous borgnes et débouchants. Nous avons souhaité observer la relation entre la dimension minimale d'un volume à dépoudrer et la hauteur de poudre enlevable avec le PRS, en suivant notre protocole expérimental. Nous avons donc réalisé des pièces tests présentant des trous cylindriques borgnes de différents diamètres. Les hauteurs dépoudrées ont été mesurées sur plusieurs pièces et compilées sur la figure 3.10. Les trous dont le diamètre est inférieur à 4 mm ne sont pas mesurables avec nos appareils de mesure. Au-delà de 14 mm, les hauteurs dépoudrables deviennent importantes et nécessitent la réalisation de pièces de grandes dimensions incompatibles avec le volume de fabrication de notre machine.

La courbe d'évolution de la hauteur de poudre enlevée en fonction du diamètre du trou cylindrique est quasiment linéaire. Le rapport entre la hauteur dépoudrée et le diamètre peut être considéré comme constant pour la plage de diamètres observés (Figure 3.11). Pour la suite de nos travaux, nous considérerons qu'il est possible de dépoudrer une hauteur double par rapport au diamètre du trou cylindrique. Par ailleurs, nous considérerons que cette relation s'applique à la dimension minimale de la section du volume à dépoudrer plutôt qu'au diamètre, afin de pouvoir l'utiliser pour des volumes dont la section n'est pas cylindrique.

Les expérimentations précédentes traitent du dépoudrage de volumes borgnes, c'est-à-dire n'étant accessibles que suivant une direction. Le dépoudrage des volumes débouchants est plus difficile à quantifier expérimentalement, à cause du comportement du volume de poudre au milieu de celui à dépoudrer. Nous avons constaté expérimentalement que ce volume se comporte souvent comme un bouchon : une fois les deux volumes accessibles

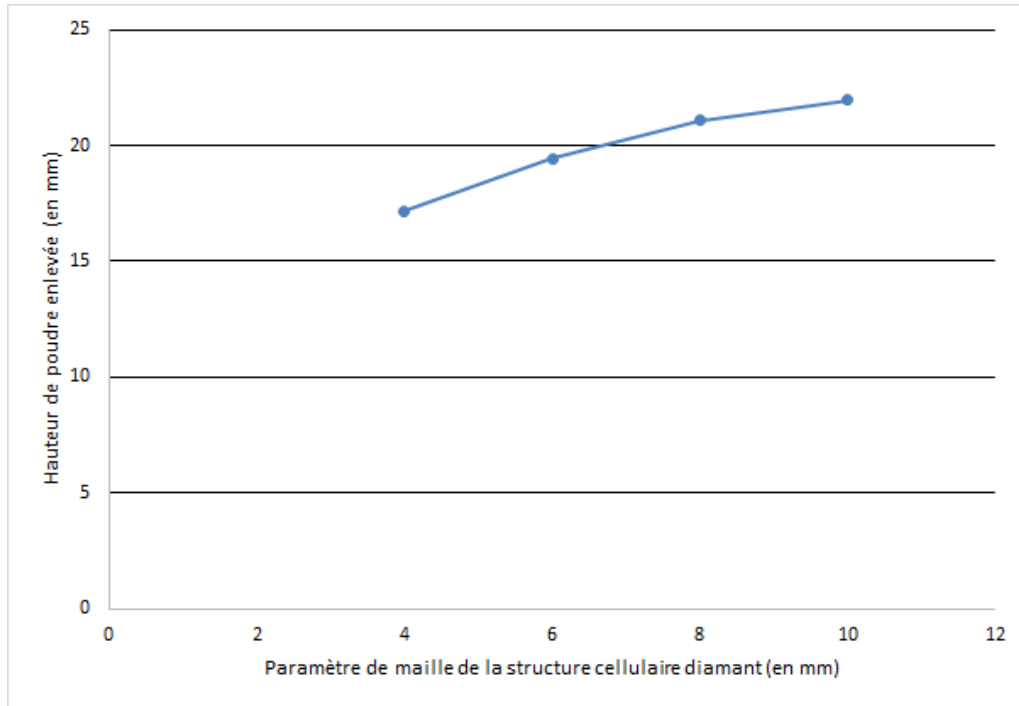


FIGURE 3.9 – Evolution de la hauteur de poudre enlevée (en mm) en fonction du paramètre de maille (en mm) d'un treillis de motif diamant de 20% de densité

vidés, la partie centrale, à condition qu'elle soit suffisamment fine, peut être enlevée par la suppression exercée par le flux d'air. La détermination expérimentale de la hauteur dépoudrable est fastidieuse car il est nécessaire de faire varier la hauteur des pièces tests, afin de vérifier si la totalité du volume a été enlevée. Déterminer la hauteur maximale nécessite la fabrication de très nombreuses pièces de test. Nous n'avons pas réalisé suffisamment de pièces pour déterminer ces valeurs, nous considérerons donc que la hauteur de poudre qui peut être enlevée d'un volume débouchant, est le double de celle contenue dans un volume borgne. En réalité, nous avons observé expérimentalement que les volumes dépoudrables sont supérieurs à cette hypothèse. Il est ainsi possible d'enlever la poudre d'un trou cylindrique débouchant de diamètre 6 mm et de 30 mm de long, en suivant notre protocole expérimental (alors que notre proposition donnerait $2 * 12 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$ de hauteur dépoudrable).

Au delà de cette plage de dépoudrage économique, il peut être possible d'enlever la poudre consolidée, le système PRS ne suffit cependant plus. Il faut alors changer de procédé de dépoudrage : nous pouvons avoir recours à des opérations d'enlèvement mécanique manuelle avec des outils ou par usinage, par exemple. Cette opération est alors plus longue ; la poudre récupérée est polluée et ne peut être réutilisée.

Conclusion Nous avons montré que le dépoudrage économique des pièces réalisées en EBM n'est pas toujours réalisable. Il existe une relation entre la quantité de poudre qu'il est possible d'enlever avec le PRS et la géométrie du volume de la poudre consolidée. Cette relation est quasi-linéaire, le rapport entre la dimension et la hauteur dépoudrable

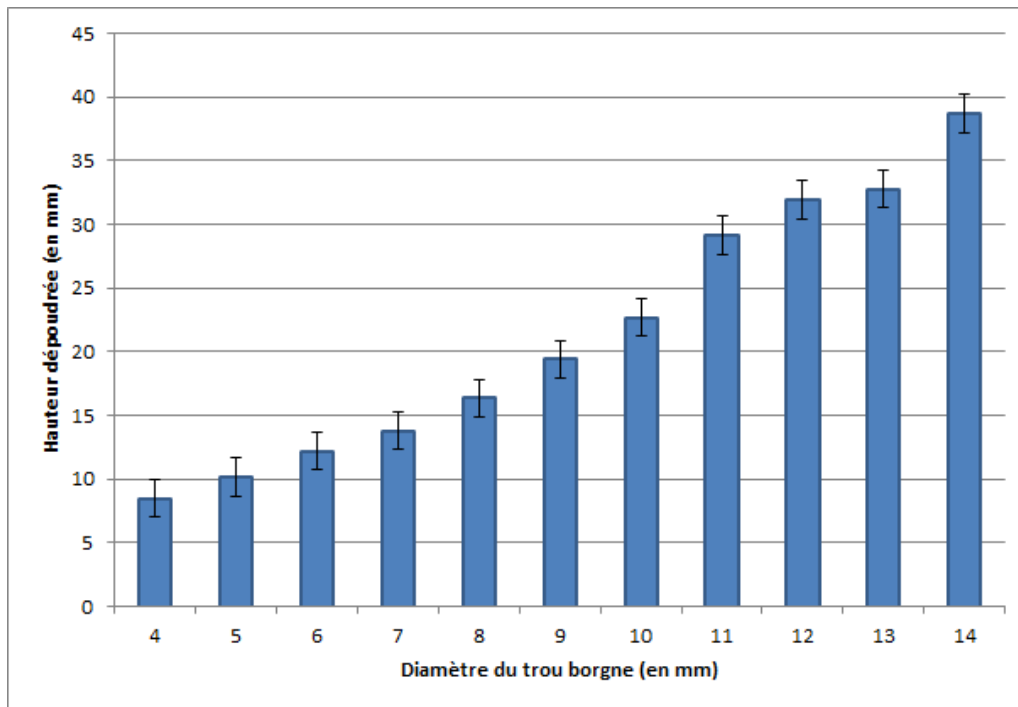


FIGURE 3.10 – Hauteur moyenne dépoudrée (en mm) en fonction du diamètre du cylindre contenant la poudre consolidée (en mm). La figure 3.11 montre la relation entre hauteur et diamètre.

se situe entre 2 et 2,5 pour des dimensions comprises entre 4 et 14 mm. Dans le cas de volumes débouchants, ce ratio est compris entre 4 et 5. Cette relation doit être utilisée dès la phase de conception afin de s'assurer de la fabricabilité des produits conçus et de diminuer le coût des produits fabriqués.

En ce qui concerne le dépoudrage des treillis et des volumes peu accessibles, des expérimentations supplémentaires ou le développement d'un modèle lié au calcul de la perte de charge causée par les treillis, sont nécessaires pour pouvoir quantifier les volumes de poudre enlevables, du point de vue économique.

3.3.4 Problématique thermique

La principale contrainte de fabrication du procédé EBM concerne la gestion de la température à l'intérieur des couches. L'aspect thermique de la fabrication par EBM influe sur la microstructure, l'intégrité du matériau et la présence éventuelle de porosités et de déformations. Le procédé EBM met en jeu une grande quantité d'énergie due à la forte puissance du faisceau d'électrons. Le vide secondaire lors de la fabrication limite les pertes par convection ; les pertes par rayonnement sont minimisées par la présence d'un bouclier thermique autour de la zone de fabrication, dans la machine. Par ailleurs, la conduction thermique est très différente entre la poudre consolidée et le matériau dense, à cause de la différence de densité. La dissipation d'énergie au niveau de la zone fondue, et donc de la chaleur, est principalement réalisée par conduction à travers les volumes déjà fondus dans les couches précédentes.

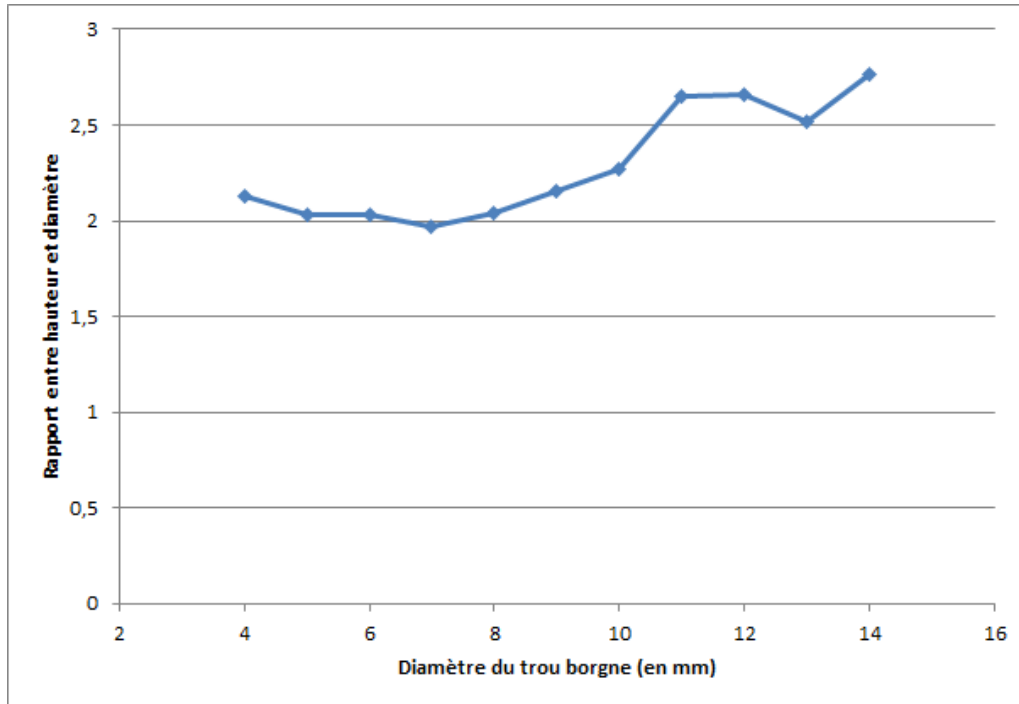


FIGURE 3.11 – Evolution du rapport hauteur dépoudrable sur diamètre du cylindre, en fonction du diamètre (en mm) du cylindre qui contient la poudre consolidée

Nous allons tout d'abord décrire le phénomène de déformation thermique. Ensuite, nous regarderons l'influence de l'orientation des surfaces sur leur fabricabilité. Nous discuterons de la prise en compte de ces phénomènes dans les paramètres de fabrication et de l'influence de la géométrie. Enfin, nous nous intéresserons aux supports et à leur effet sur les déformations thermiques et les porosités.

Déformation thermique Lorsque la quantité d'énergie à évacuer est trop importante, les surfaces des volumes en porte-à-faux se déforment. La figure 3.12 illustre ce phénomène : la pièce réalisée comporte un volume en porte-à-faux, un parallélépipède peu épais dont l'orientation est quasiment horizontale ; elle présente des déformations importantes, particulièrement au niveau des contours extérieurs de la surface supérieure.

Ce phénomène est pénalisant à deux titres : la présence de déformations thermiques ne permet généralement pas de tenir des spécifications géométriques serrées car elles peuvent atteindre plusieurs millimètres d'amplitude ; ces déformations peuvent également endommager la machine de production. En effet, l'approvisionnement en poudre est effectué par le déplacement d'un râteau et lorsqu'une pièce se déforme légèrement, les dents du râteau se déforment également. L'approvisionnement en poudre n'est plus correctement effectué. Pour des déformations plus importantes (de l'ordre de plusieurs millimètres), les dents peuvent s'arracher et la pièce peut entrer en collision avec la partie structurale du râteau.

Les déformations sont observées principalement sur les volumes en porte-à-faux ainsi qu'au niveau des contours des pièces. En effet, ces deux zones sont celles qui sont les plus

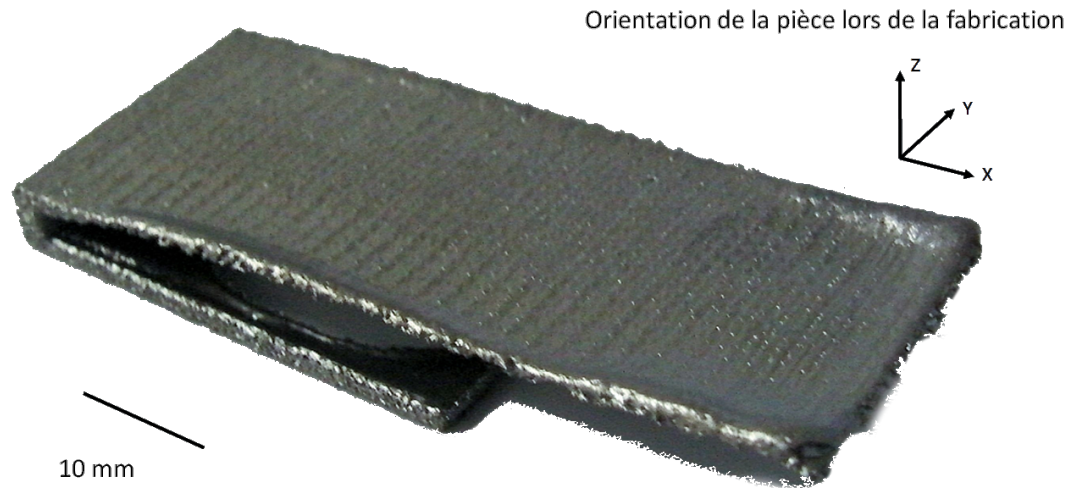


FIGURE 3.12 – Déformations thermiques sur un volume réalisé en porte-à-faux

propices au phénomène d'accumulation de chaleur (Figure 2.9).

Impact de l'orientation Les déformations thermiques se caractérisent par de grands déplacements locaux des surfaces. Ces déformations interviennent lors de la fabrication de volumes en porte-à-faux sans utilisation de supports. Nous avons réalisé plusieurs parallélépipèdes (de 50 mm * 20 mm * 1 mm, Figure 3.12) orientés de 0 à 90° par rapport au plan X,Y de la machine. Nous avons observé que la fabrication de ces pièces n'est pas possible sans déformation lorsque l'angle qu'ils forment avec la plaque de départ est inférieur à 15°. Lorsque l'orientation est trop faible, la valeur du défaut de planéité est de l'ordre du millimètre (au lieu de quelques dixièmes de millimètres).

Impact de la position verticale Nous n'avons pas mesuré de différence significative pour les déformations, en fonction de la position verticale de la pièce, au sein du lit de poudre, par rapport à la plaque de départ. Cette position ne semble donc pas avoir d'impact sur leur déformation thermique (tant qu'elles ne sont pas à proximité immédiate ou en contact avec la plaque) contrairement à leur orientation dans le volume de fabrication qui retentit fortement sur la présence et l'amplitude des déformations.

Fonctions de compensation Les paramètres de fabrication sont déterminés par le logiciel qui pilote la machine EBM afin de réaliser des pièces denses tout en évitant les surchauffes. Pour chaque matériau, une température cible est choisie afin que les paramètres initiaux de chaque couche soient les mêmes (750°C pour le Ti6Al4V par exemple). Pour chaque ligne balayée, la quantité d'énergie à apporter est déterminée afin de calculer les paramètres de vitesse de balayage et d'intensité du faisceau d'électrons. La vitesse est modulée pour prendre en compte les accumulations de chaleur dues à une conductivité plus faible si l'épaisseur suivant l'axe vertical est faible (*Thickness function*), ainsi que les accumulations de chaleur au niveau des contours des surfaces balayées (*Turn-*

point function). Ces fonctions de compensation sont librement modifiables par l'opérateur qui peut les adapter à la géométrie de la pièce. L'augmentation de la vitesse de balayage permet de diminuer localement la quantité d'énergie apportée. Si cette énergie est trop faible, il est possible que la fusion ne soit pas complète et que la pièce présente des porosités.

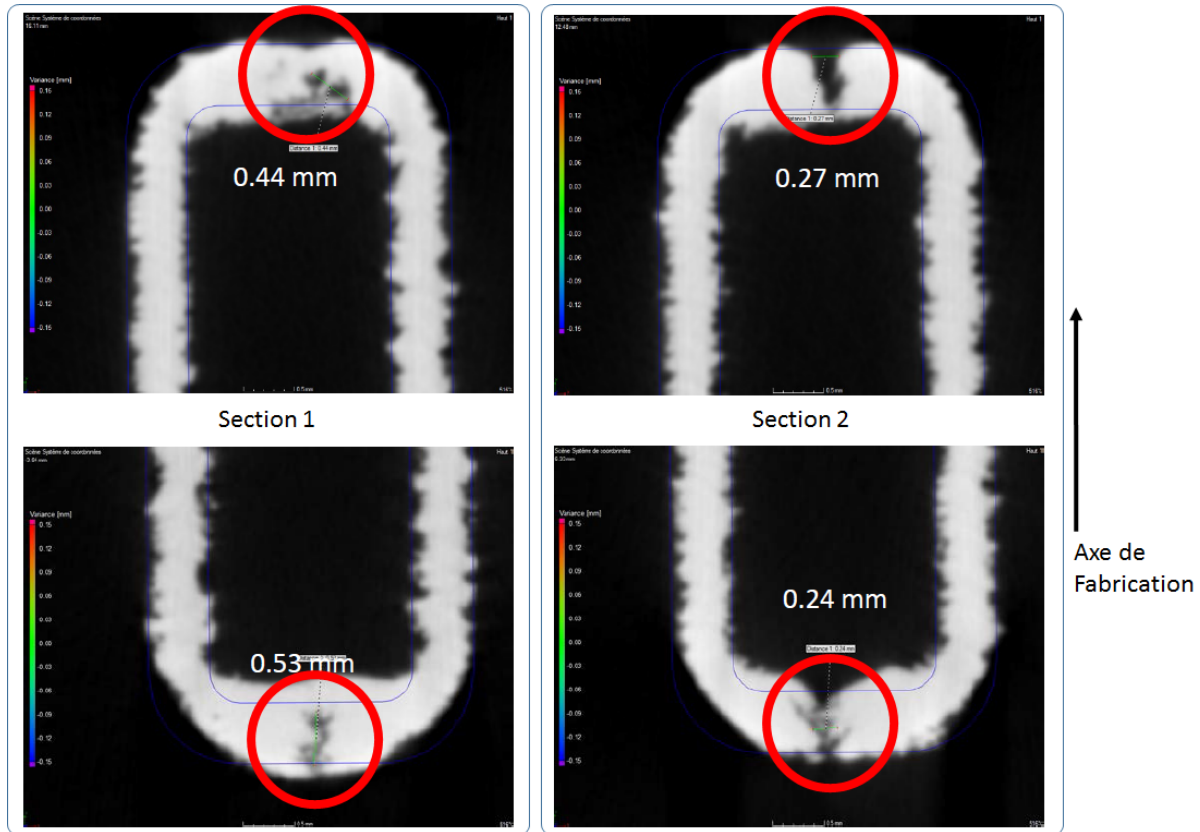


FIGURE 3.13 – Images de deux sections de la pièce guide d'onde (Figure 2.3) obtenues par tomographie. Des porosités ouvertes (entourées en rouge) sont présentes dans les volumes inférieurs et supérieurs.

Ces fonctions permettent de décider du compromis entre risque de surchauffe (cause de déformations) et risque de porosité. Le compromis permettant de réaliser des volumes sans déformation ni porosité n'est toutefois pas toujours possible (Figure 3.13). Ces fonctions de compensation doivent être adaptées à la géométrie et sont très complexes à régler. La fabrication de volumes en porte-à-faux peut donc conduire à une dégradation des propriétés du matériau en raison de la présence de porosités. Nous avons effectué des essais préliminaires pour déterminer des valeurs optimales de ces paramètres et ce point fait actuellement l'objet de travaux au laboratoire, comme nous le verrons dans les perspectives de ce travail de thèse.

Structures support Pour éviter les situations qui conduisent à d'importantes déformations thermiques, les procédés additifs ont habituellement recours à des supports. Ces structures permettent de limiter les déformations des pièces lors de la fabrication. A l'is-

sue de la fabrication, elles sont généralement enlevées et recyclées. Si certains procédés de fabrication additive utilisent un matériau différent pour leur réalisation (procédé FDM bi-buses par exemple), les procédés en lit de poudre réalisent ces structures à partir du même matériau que celui des pièces (Figure 3.14).

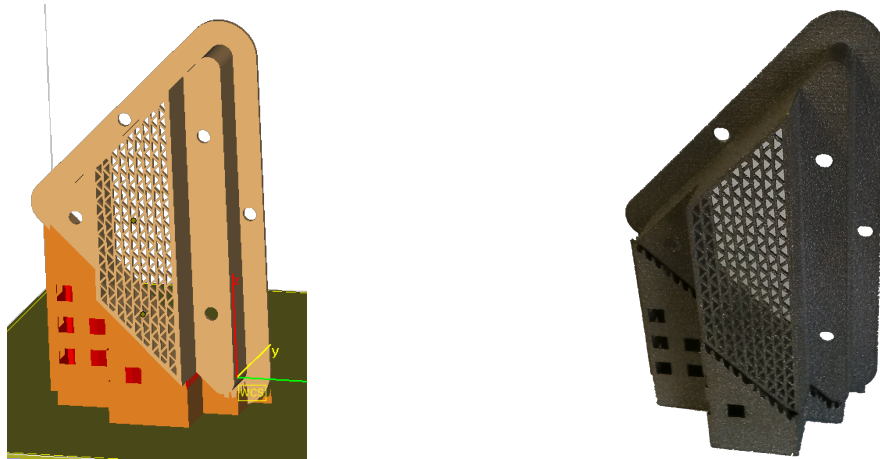


FIGURE 3.14 – Supports générés sur MAGICS (à gauche) et fabriqués par EBM (à droite). Ils sont constitués de nombreux voiles minces et d’ergots dans la partie supérieure qui assurent le contact avec la pièce.

Les supports sont générés lors de la préparation des fichiers numériques une fois les pièces orientées et positionnées dans le volume virtuel de fabrication. Le choix de la forme et des dimensions des supports doit être un compromis entre la conduction thermique et la consommation de matière première. Dans la phase expérimentale qui suit, nous avons choisi comme type de supports des cylindres de diamètre minimum (0,6 mm). Ce choix permet de se focaliser sur une structure simple afin de pouvoir étudier l’impact de la position et de la densité des structures support.

Position et densité des supports Pour pouvoir aisément quantifier les déformations, nous avons choisi comme pièces test des parallélépipèdes de 20 mm * 50 mm dans le plan (X,Y) et de 1 mm d’épaisseur suivant l’axe vertical (Figure 3.15). Afin d’avoir un indicateur sur l’amplitude des déformations, nous avons effectué une cartographie des différentes hauteurs suivant l’axe vertical des points scannés sur la surface supérieure (à l’aide d’un scanner Laser).

Dans les configurations testées préliminairement, nous avons mesuré les plus grandes déformations au niveau des contours des pièces (Figure 3.16), à cause de l’accumulation d’énergie due à la moindre conductivité de la poudre consolidée, malgré l’activation des fonctions de compensation. Par conséquent, lorsqu’il est nécessaire d’utiliser des supports, il faut positionner une partie de ceux-ci aux extrémités des surfaces négatives (dont la normale est orientée suivant l’axe de fabrication, vers le bas - voir le glossaire -). La quantité de supports à placer est également un facteur important. La figure 3.16 montre le phénomène de distorsion thermique, qui peut également se produire malgré la présence de supports. En effet, lorsque la quantité de supports est trop faible, la pièce se déforme et décolle les structures supports de la plaque de départ, nous assistons alors au même phénomène qu’en l’absence de support.

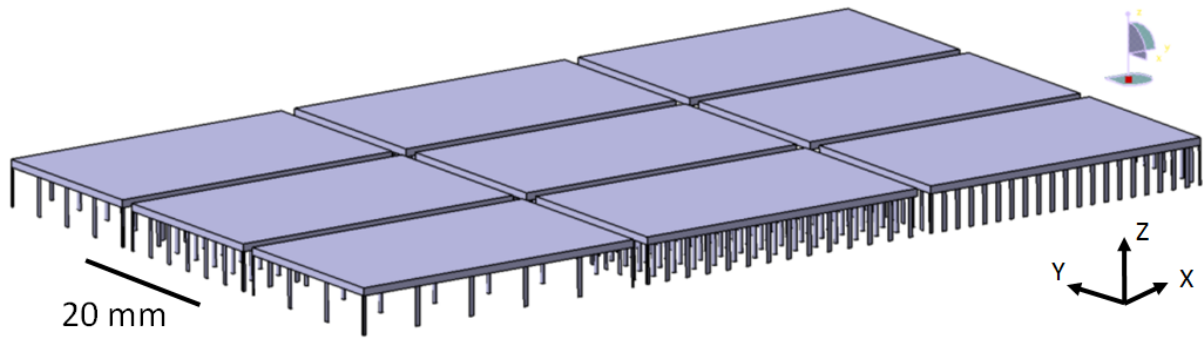


FIGURE 3.15 – Modèles CAO de pièces test avec différentes densités de supports

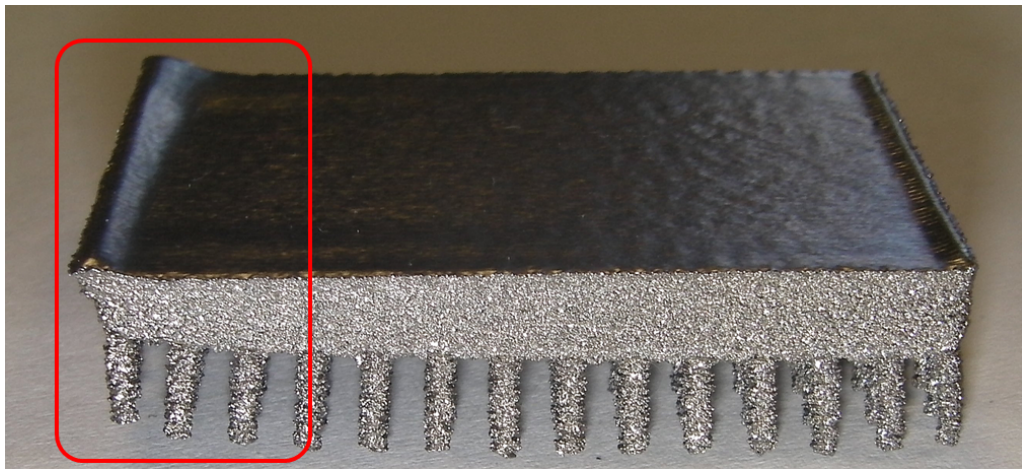


FIGURE 3.16 – Déformations aux extrémités d'une pièce réalisée par EBM et mise en évidence du phénomène de rétractation qui décolle les supports de la plaque de départ (encadré en rouge).

Nous avons cherché à déterminer l'existence d'un optimum dans le compromis déformation - nombre de supports. Pour ce faire, nous avons fait évoluer la densité de supports équidistants pour établir une relation entre cette densité et les déformations de la surface supérieure (Figure 3.17). L'amplitude des déformations a été mesurée en faisant l'acquisition d'un grand nombre de points de la surface supérieure, à l'aide de notre capteur optique. Cette amplitude correspond à la hauteur maximale mesurée entre les points et un plan (d'environ 30 mm * 10 mm) construit par la méthode des moindres carrés au centre de la surface.

Pour la pièce test considérée, les résultats expérimentaux montrent que l'amplitude des déformations est semblable pour un espacement de supports de 2 à 8 mm. Au-dessus de 8 mm, l'amplitude des déformations croît avec l'augmentation de l'espacement des supports. Ces résultats expérimentaux montrent l'existence d'une densité de support en-dessous de laquelle il n'y a plus de gain significatif quant à la déformation mesurée. Cette valeur limite peut être considérée comme un optimum car elle permet d'obtenir les déformations minimales avec le plus faible nombre de support, et donc une consommation de

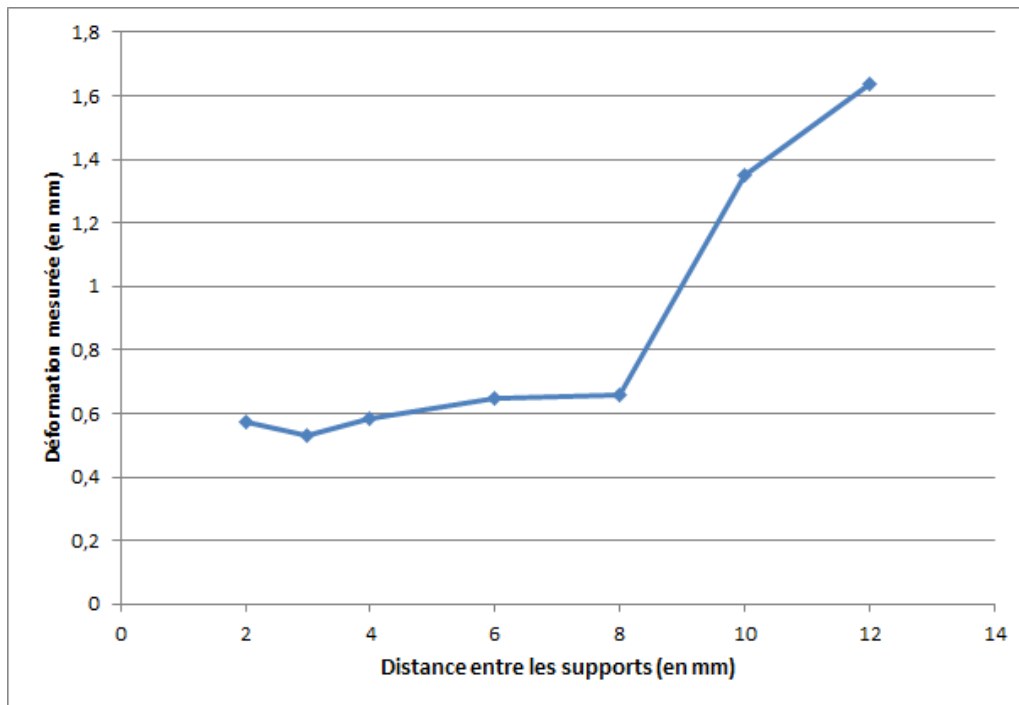


FIGURE 3.17 – Evolution de hauteur maximale (en mm) des points scannés sur la surface supérieure des pièces tests en fonction de l’espacement entre les structures support (en mm)

matière minimale de même qu’une opération d’enlèvement de supports facilitée. Comme nous l’avons mentionné précédemment, les amplitudes de déformations maximales se trouvent au niveau des contours de la surface supérieure, quelle que soit la densité de supports utilisée (Figure 3.18).

Enlèvement des supports Une fois la fabrication terminée, les supports doivent généralement être enlevés. Cette opération peut être réalisée manuellement (avec ou sans outils) ou par usinage. L’enlèvement manuel consiste à arracher les supports au niveau de l’interface support/pièce et nécessite, tout comme l’enlèvement par usinage, l’accès aux supports une fois la pièce fabriquée. Il est par exemple particulièrement complexe, voire impossible, d’enlever les supports contenus dans des volumes partiellement fermés et profonds tels les tubes. Cette contrainte doit être considérée dès la phase de conception.

Conclusion Nous avons vu que la problématique thermique est très importante pour le procédé EBM. Une accumulation de chaleur peut conduire à des déformations alors qu’une fusion partielle peut provoquer la présence de porosités. Des fonctions de compensation permettent de moduler la quantité apportée dans les zones critiques et d’éviter les accumulations de chaleur. Ces fonctions sont néanmoins dépendantes de la géométrie des pièces fabriquées. Elles permettent de trouver des compromis entre déformation et risque de porosités (qui impactent les propriétés du matériau). Des structures supports doivent être utilisées lors de la fabrication pour limiter la déformation des volumes en

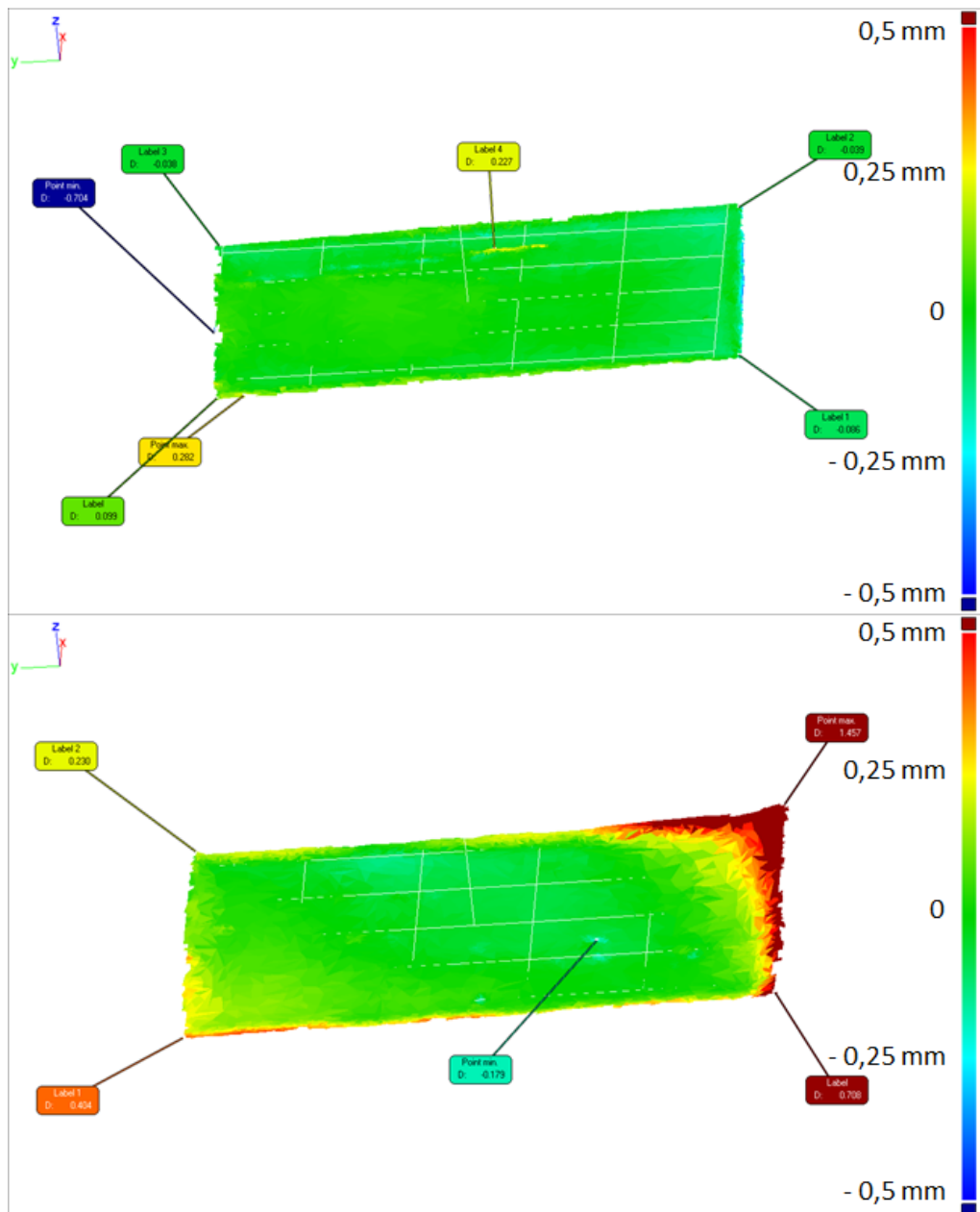


FIGURE 3.18 – Cartographie des hauteurs des points scannés sur deux pièces tests, en haut avec un espacement des supports de 2 mm et en bas avec un espacement de 12 mm ; la déformation maximale mesurée est beaucoup plus importante dans le second cas (1,6 mm), lorsque la densité est plus faible, que dans le premier (0,6 mm).

porte-à-faux. Nous avons montré, sur une pièce test, qu'il est possible de trouver une densité de support qui limite les déformations et le nombre de supports.

3.3.5 Qualité des pièces

Il est nécessaire d'estimer la capacité d'un moyen de fabrication afin de discuter de la pertinence de son emploi et du besoin d'opérations de finition. Le procédé EBM met en jeu des poudres d'alliages métalliques dont la granulométrie, comprise entre 40 et 120 μm , est plus importante que celles des moyens Laser. Cette forte granulométrie, ainsi que les hautes énergies mises en jeu ont un impact sur la qualité des pièces réalisées. Nous allons nous intéresser aux qualités dimensionnelles et surfaciques des pièces fabriquées par EBM ainsi qu'aux propriétés des matériaux utilisés.

Qualité surfacique Les procédés de fabrication additive ont la réputation de réaliser des pièces ayant des états de surface grossiers. Cela s'explique par la fabrication en couches, ainsi que par la présence de particules qui entourent la zone de fusion. En effet, certaines particules peuvent fondre localement et rester accrochées à la pièce, même une fois dépouvrée. Nous avons pu observer ce phénomène à l'occasion de contrôles de micro-géométries effectués par microscopie à balayage (Figure 3.19). Ce phénomène de fusion partielle se produit au niveau des frontières de la zone de fusion. Les surfaces positives (dont la normale est orientée suivant l'axe de fabrication, vers le haut, voir le glossaire) sont moins touchées par ce phénomène car elles sont déjà solidifiées lorsque la couche de poudre suivante est apportée. Il existe donc une anisotropie en ce qui concerne la qualité des surfaces réalisées en EBM.

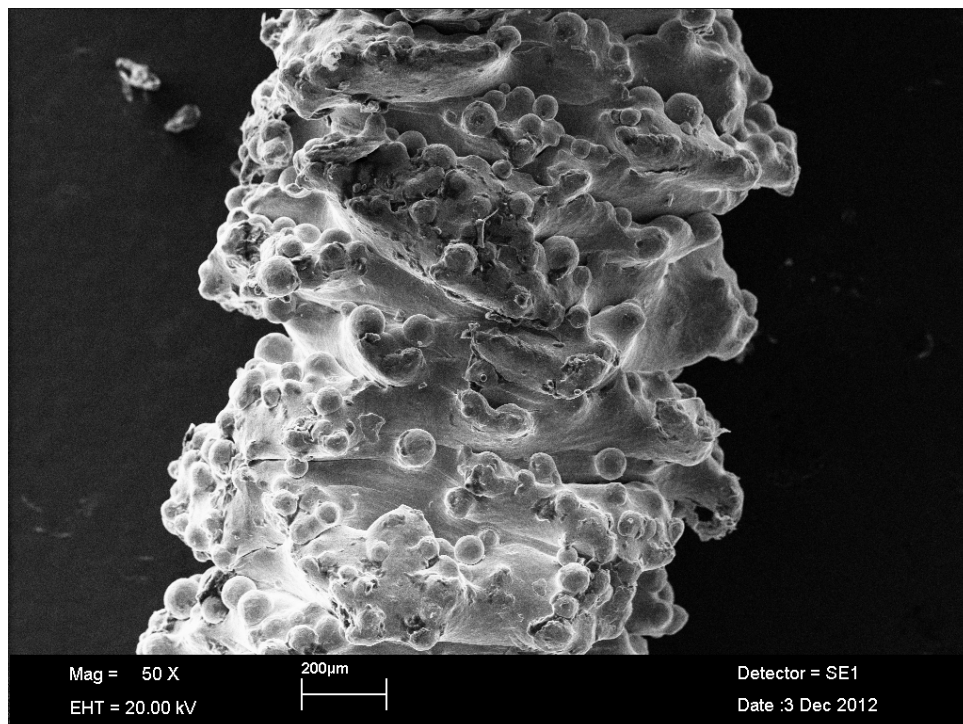


FIGURE 3.19 – Poutre cylindrique de 1 mm de diamètre observée par microscopie à balayage

Nous avons mesuré, à l'aide d'un rugosimètre mécanique, la rugosité de dix surfaces

planes (positives) horizontales et verticales. Les valeurs mesurées moyennes sont compilées dans le tableau suivant (les écarts types des séries de mesure sont inférieurs à $0,5 \mu\text{m}$) :

Surface mesurée	Ra	Rt
Plan horizontal, suivant X	$6,1 \mu\text{m}$	$39,8 \mu\text{m}$
Plan horizontal, suivant Y	$3,5 \mu\text{m}$	$31,0 \mu\text{m}$
Plan vertical	$28,75 \mu\text{m}$	$188,3 \mu\text{m}$

Les rugosités des surfaces positives horizontales sont meilleures que celles des plans verticaux. L'anisotropie de la rugosité dans le plan horizontal s'explique par les ondulations laissées par le passage du faisceau d'électrons lors de la dernière couche. La rugosité des surfaces horizontales négatives n'a pu être quantifiée avec notre moyen de mesure car leur rugosité totale est supérieure à $200 \mu\text{m}$. Ces qualités d'état de surface mesurées posent problème si l'on considère les pièces fines. En effet, pour celles-ci, la dimension minimale réalisable (environ $0,6 \text{ mm}$) est du même ordre de grandeur que la rugosité totale mesurée (environ $0,2 \text{ mm}$). L'amplitude des variations de la géométrie peut alors compliquer le dimensionnement puisque, dans ce cas, la section qui participe à la résistance mécanique ou au transfert thermique n'est pas la section souhaitée, visualisé sur la figure 3.19.

Qualité dimensionnelle L'incertitude dimensionnelle du procédé EBM a été quantifiée par la mesure des dimensions de dizaines de pièces prismatiques de grandes tailles (de 100 mm et 165 mm de long) suivant les trois axes de la machine. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'une colonne de mesure. Nos résultats sont compilés sur la figure 3.20. Nous avons apprécié l'erreur moyenne et l'étendue de mesure.

L'erreur moyenne est de $0,15 \text{ mm}$ dans le plan, et de $0,2 \text{ mm}$ selon l'axe vertical. Elle dépend de la calibration de la machine, du coefficient de dilatation utilisé et du jeu de paramètre (principalement la quantité d'énergie apportée pour fondre les contours des pièces). L'étendue de la mesure est de $0,17 \text{ mm}$ dans le plan et de $0,54 \text{ mm}$ suivant l'axe vertical, nous n'avons pas observé d'anisotropie significative dans le plan. La valeur de l'étendue dans le plan peut être mise en relation avec les mesures de rugosités que nous avons précédemment effectuées; cette incertitude dimensionnelle peut s'expliquer par la variation importante de la micro-géométrie locale. L'étendue des mesures selon l'axe vertical est du même ordre de grandeur que la déformation observée sur les surfaces planes de la figure 3.18.

Propriétés mécaniques Nous avons effectué un essai de traction pour valider le comportement du matériau fondu (Figure 3.21). Le tableau suivant affiche une comparaison de nos résultats avec ceux d'essais trouvés dans la littérature ainsi qu'avec les normes ASTM relatives à l'alliage Ti6Al4V moulé (ASTM 1108) et forgé (ASTM 1472) :

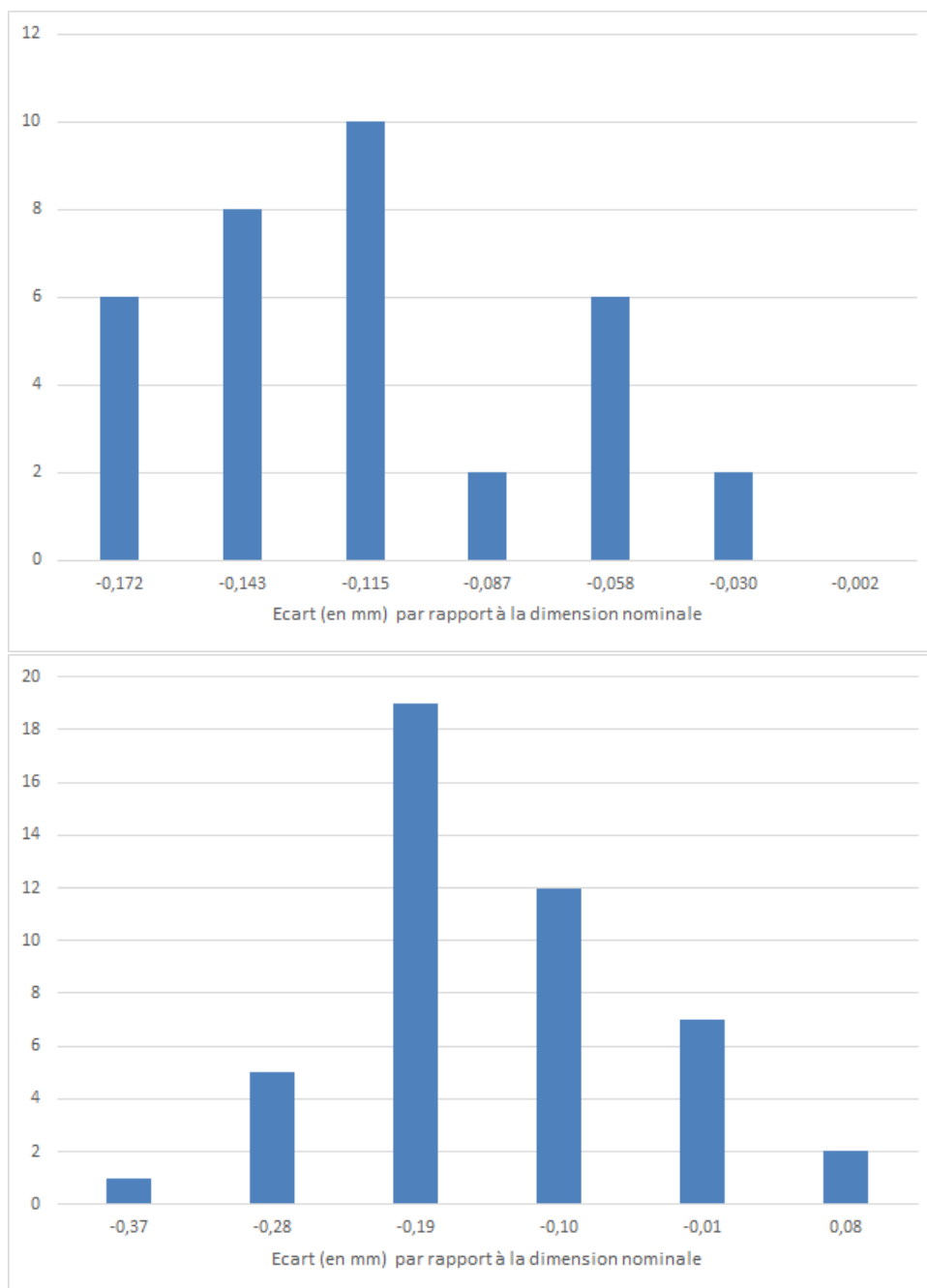


FIGURE 3.20 – Distributions des écarts (en mm) mesurés sur des cales fabriquées par EBM dans le plan X,Y (en haut) et suivant l’axe vertical (en bas)

Référence	E	$R_{e0,2\%}$	R_m	A%
Mesures	106 GPa	831 MPa	883 MPa	9,2%
Rafi [RKG ⁺ 13]	101 GPa	782 MPa	842 MPa	9,9%
Murr [MEQ ⁺ 09]	-	1000 MPa	1200 MPa	20%
ASTM 1108 [F0409]	118 GPa	758 MPa	860 MPa	>8%
ASTM 1472 [F0408]	118 GPa	860 MPa	930 MPa	>10%

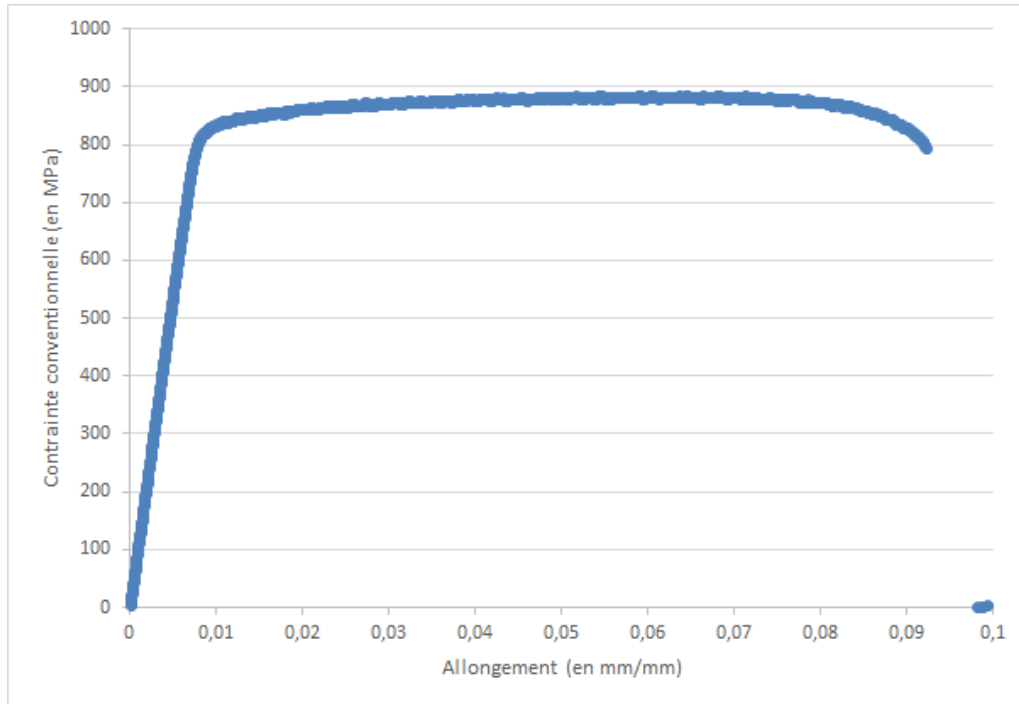


FIGURE 3.21 – Courbe de traction d’une éprouvette de 6 mm de diamètre réalisée verticalement

Le comportement observé respecte la plupart des minima de la norme ASTM relative au moulage et reste en-dessous des minima relatifs au forgeage, contrairement aux résultats présentés par Murr [MEQ⁺09]. Un écart peut être noté pour le module de Young que nous avons mesuré, qui est également présent dans les mesures de Rafi [RKG⁺13]. Ces dernières donnent d’ailleurs des résultats cohérents avec les nôtres. Ces différences s’expliquent vraisemblablement par des paramètres de fusion différents.

Conclusion Une fois la fabrication achevée, la poudre non fondue doit être retirée de la pièce. Cette poudre, consolidée par le faisceau d’électrons, est difficilement enlevable des volumes profonds et des treillis. Nous avons établi une relation entre le diamètre d’un volume cylindrique et la profondeur de poudre récupérable à l’aide du PRS. Si la hauteur du volume est supérieure à cette valeur, d’autres procédés doivent être utilisés.

Nous avons vu l’importance de la prise en compte des phénomènes thermiques lors de la fabrication de pièces par le procédé EBM. Les disparités de température, généralement causées par une dissipation thermique trop faible localement, causent des déformations au sein des pièces. Des fonctions de compensation permettent de diminuer l’énergie dans les zones propices à ces accumulations de chaleur (surfaces négatives et contours) mais ces fonctions dépendent de la géométrie de la pièce et peuvent conduire à la présence de porosités qui dégradent les propriétés du matériau. Afin de limiter ces deux phénomènes, le balayage de la pièce peut être modifié pour limiter le nombre de surfaces négatives, en particulier pour les surfaces fonctionnelles.

Lorsque le balayage ne permet pas d’éviter la présence de surfaces négatives et de volumes en porte-à-faux, il est nécessaire de placer des supports pour dissiper l’énergie

et limiter les déformations. Ces supports doivent être placés au niveau des contours et sous les surfaces négatives. Nous avons montré qu'il existe un compromis entre densité des supports et déformations. Il n'existe cependant pas aujourd'hui de recommandations pour choisir cette densité.

La qualité des pièces réalisées par le procédé EBM est inférieure à celle des pièces réalisées par usinage. Les états de surfaces sont meilleurs sur les surfaces horizontales positives que sur les surfaces verticales, celles-ci présentant cependant généralement moins de déformations. Cette anisotropie se retrouve, mais de manière inversée, pour la qualité dimensionnelle. Les valeurs mesurées au niveau des surfaces, suivant les axes X et Y, sont à mettre en relation avec l'état de surface dégradé qui introduit une incertitude locale sur la position de la surface. La dispersion importante des mesures effectuées dans la direction verticale est à relier à la déformation qui se produit au niveau des contours des surfaces.

Enfin, nous avons contrôlé le comportement mécanique de l'alliage réalisé par EBM en effectuant un essai de traction sur une éprouvette verticale. Les résultats obtenus montrent que les minima de la norme ASTM relative au Ti6AL4V moulé sont respectés, mis à part le module de Young un peu inférieur. Ces résultats sont cohérents avec une partie des travaux publiés dans la littérature, mais inférieurs à ceux qui montrent des propriétés mécaniques respectant les standards du matériau forgé.

3.4 Durée de fabrication et coût des pièces fabriquées par EBM

Nous avons vu précédemment les contraintes de fabrication du procédé EBM. La durée et le coût de production des pièces sont également des facteurs importants qui interviennent lors de la conception. Nous voulons déterminer la manière dont la conception des pièces impacte ces deux critères et quelles préconisations permettent de les réduire.

Dans un premier temps nous nous intéresserons au temps de fabrication de pièces. Nous établirons ensuite un modèle de coût des pièces fabriquées en EBM.

3.4.1 Durée de fabrication

Connaître la cadence de production d'un moyen de fabrication est essentiel dans l'industrie, pour pouvoir garantir une fabrication dans les délais. Les données qui concernent le temps de fabrication interviennent par ailleurs dans le modèle de coût que nous proposerons. Dans le contexte de ce travail de thèse, nous chercherons à établir l'influence de la conception sur la durée d'obtention de pièces par EBM.

Préparation des fichiers numériques Il est dans un premier temps nécessaire de préparer les différents fichiers numériques à partir des fichiers CAO. Les opérations à réaliser sont les suivantes :

- import des différents fichiers des pièces,
- vérification de l'intégrité des fichiers,
- choix du balançage de chaque pièce,
- application des coefficients de dilatation,

- mise en position des pièces dans le volume de fabrication virtuel,
- génération des supports,
- export des modèles tridimensionnels,
- tranchage des modèles tridimensionnels,
- import sur la machine, choix des paramètres de fabrication.

La durée de cette phase dépend du nombre et de la complexité des pièces à fabriquer. Pour un lot de pièces simples ne nécessitant ni génération de supports, ni réparation de fichiers (par exemple un des lots qui figurent sur la figure 3.22), la durée de cette opération est d'environ 15 minutes. Si les fichiers discrétisés (format de fichier stl) présentent des erreurs à corriger, ou s'il est nécessaire de générer des supports complexes, voire de modifier les paramètres de fabrication, cette opération peut prendre plusieurs heures mais n'est effectuée qu'une fois, quelque soit le nombre de pièces à fabriquer.

Préparation de la machine La préparation de la machine consiste à enlever la poudre présente ainsi que les dépôts de métaux sur sa structure, puis à préparer le lit de poudre pour la première couche de la fabrication :

- nettoyage de la machine,
- remplissage des réservoirs de poudre,
- nettoyage ou changement des éléments de protection contre la métallisation,
- préparation, positionnement et orientation de la plaque de départ,
- préparation du lit de poudre pour la première couche de poudre.

Mise sous vide Le faisceau d'électrons nécessite un vide poussé pour fonctionner. Une fois la machine préparée, elle est fermée hermétiquement et un système de pompes à vide aspire l'air progressivement et de manière continue.

Réglage du canon à électrons Quand un vide suffisant est atteint (pression inférieure à $5 \cdot 10^{-7}$ bar) dans l'enceinte de fabrication, il est possible d'alimenter le canon d'électrons. La prise d'origine machine au centre de la plaque de départ est effectuée, ainsi que la calibration du faisceau d'électrons. Ces deux opérations se font visuellement et leur durée dépend de la maîtrise de l'opérateur.

Mise à température de la plaque de départ Après réglage du canon d'électrons, la plaque de départ est chauffée jusqu'à atteindre une température de 750 °C. La durée de cette opération dépend de la taille de la plaque choisie.

Réalisation des couches Les pièces sont ensuite réalisées par couches successives. La durée de cette opération est la somme des durées de réalisation de chaque couche. La valeur minimale pour une couche est de 14 s, c'est la durée de la descente du lit de poudre (de 50 ou 70 μm), du dépôt de poudre par le râteau et de la consolidation par chauffage. Le temps de fusion des pièces et des supports dépend de leur surface dans la couche considérée, mais aussi de leur complexité. Du fait de paramètres de fabrication différents, fusionner de larges surfaces est en effet, plus rapide, à surfaces balayées équivalentes, que réaliser des contours. L'augmentation du temps de réalisation d'une couche ne dépend pas linéairement du nombre de pièces, à cause de la durée fixe de 14 s au début de chaque

couche, des phases de chauffage intermédiaires éventuelles et des limites de longueur des trajectoires balayées. Doubler la hauteur d'une pièce suivant l'axe vertical multiplie par deux la durée de réalisation des couches alors que doubler la surface des sections a un impact moindre comme nous l'illustrerons ultérieurement. En l'absence de problèmes lors de la fabrication, la durée de fabrication d'une couche n'excède pas 150 s sur notre machine, d'après les mesures effectuées sur l'ensemble de nos utilisations.

Refroidissement sous Hélium Une fois les pièces réalisées, un refroidissement sous Hélium est effectué jusqu'à ce que la température de la plaque de départ soit inférieure à 100 °C. La durée du refroidissement dépend du volume de poudre consolidée ainsi que du volume des pièces réalisées.

Dépoudrage Quand la température est inférieure à 100 °C, le bloc de poudre consolidé peut être extrait de la machine et les pièces dépoudrées. Si nécessaire, des opérations de finition peuvent être réalisées. La machine est ensuite nettoyée.

Synthèse Le tableau suivant récapitule les durées des différentes opérations :

Opération	Durée	Fixe ou variable
Préparation numérique	15 min mini	Variable
Préparation de la machine	20 min	Fixe
Mise sous vide	40 min	Fixe
Alimentation en énergie	5 min	Fixe
Réglage du faisceau	15 min	Fixe
Préchauffe de la plaque	25 à 40 min	Variable
Réalisation des couches	15 à 150 s/couche	Très variable
Refroidissement	3 à 8 h	Variable
Ventilation à l'air	10 min	Fixe
Sortie pièces et nettoyage	30 min	Fixe
Dépoudrage	10 min mini	Très variable

Durée de réalisation d'une pièce Afin d'illustrer la problématique de la durée de fabrication, nous considérons cinq cas de fabrication avec des pièces de dimensions comparables (Figure 3.22) :

- cas 1 : fabrication d'une unique pièce cubique pleine (30 mm de côté),
- cas 2 : fabrication de quatre pièces cubiques pleines identiques (30 mm de côté),
- cas 3 : fabrication de quatre pièces cubiques pleines identiques (30 mm de côté) et d'une pièce parallélépipédique pleine (30 mm * 30 mm * 90 mm) dont la plus grande dimension est placée verticalement,
- cas 4 : fabrication de quatre pièces cubiques évidées identiques (30 mm de côté et une épaisseur de 2 mm des parois),
- cas 5 : fabrication de quatre pièces cubiques identiques (30 mm de côté) qui présentent une structure en treillis diagonal avec des nœuds sphériques et un paramètre de maille de 3 mm.

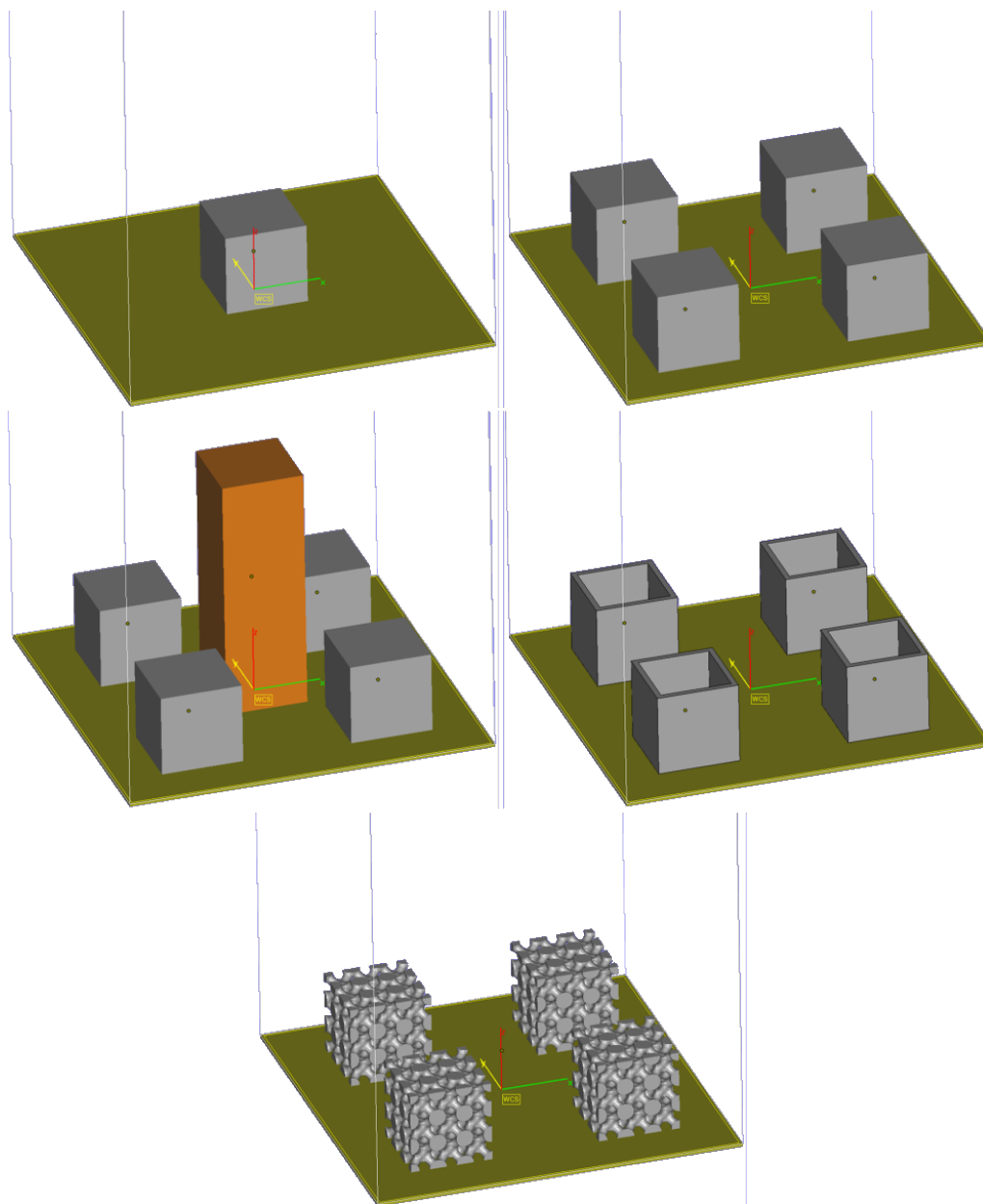


FIGURE 3.22 – Cinq cas de fabrication en EBM envisagés

Le tableau suivant détaille les durées (mesurées et simulées pour la durée de réalisation des couches) des différentes opérations ainsi que la durée totale pour les cinq cas considérés :

Opération	cas 1	cas 2	cas 3	cas 4	cas 5
Préparation numérique	15 min	15 min	15 min	15 min	15 min
Préparation machine	20 min	20 min	20 min	20 min	20 min
Mise sous vide	40 min	40 min	40 min	40 min	40 min
Alimentation en énergie	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min
Réglage du faisceau	15 min	15 min	15 min	15 min	15 min
Préchauffe de la plaque	25 min	25 min	25 min	25 min	25 min
Réalisation des couches	3h49 ^a	5h12 ^b	13h14 ^c	4h32 ^d	4h44 ^e
Refroidissement	3h30	3h30	5h	3h30	3h30
Ventilation à l'air	10 min	10 min	10 min	10 min	10 min
Sortie lot	30 min	30 min	30 min	30 min	30 min
Dépoudrage	10 min	10 min	10 min	10 min	10 min
Durée totale	10h09	11h32	21h04	10h52	11h04
Durée par pièce	10h09	2h53	2h41 et 10h19	2h43	2h46

a. ≈ 23 s par couche pendant 600 couches (de $50 \mu\text{m}$)

b. ≈ 31 s par couche pendant 600 couches

c. ≈ 33 s par couche pendant 600 premières couches puis ≈ 23 s pendant 1200 couches

d. ≈ 27 s par couche pendant 600 couches

e. $\approx 28,5$ s par couche pendant 600 couches

Lorsqu'une ou plusieurs pièces identiques sont réalisées dans la machine, la durée de fabrication de chaque pièce peut être considérée comme la durée du lot divisée par le nombre de pièces (cas 1, 2, 4 et 5). Quand plusieurs pièces différentes sont fabriquées simultanément, il est plus délicat d'estimer la contribution de chaque pièce à la durée totale de fabrication.

Cette contribution dépend de la hauteur de la pièce, en effet, une pièce deux fois plus haute cause un doublement de la durée de fabrication des couches. L'impact de la taille des sections contribue également à l'augmentation de la durée de fabrication, dans une moindre mesure. La courbe de la figure 3.23 a été réalisée en comparant les temps de fabrication des cubes pleins, cubes évidés et volumes cubiques contenant des treillis (tous ces volumes faisant 30 mm de côté). Cette figure montre la faible variation de la durée de fabrication totale par rapport à la forte variation de volume des pièces. Nous pouvons ainsi considérer qu'à volume englobant constant (c'est-à-dire à volume contenant l'intégralité de la pièce), la durée de réalisation d'une couche varie de manière négligeable.

Deux approches peuvent être considérées pour estimer la contribution d'une pièce à la durée de fabrication :

- la contribution est calculée par rapport au volume englobant d'une pièce, sans prendre en compte l'orientation de la pièce. La durée de réalisation des couches de la pièce parallélépipédique (du cas 3) est alors trois fois supérieure à celle des pièces cubiques, la durée de fabrication de celles-ci étant plus importante que lors du cas 2. La logique de cette approche est proche de celle du client qui ne s'intéresse pas aux conditions de la fabrication.
- la durée de fabrication d'une pièce peut refléter plus justement la phase de fabrication, cette durée dépend du nombre de couches réalisées ainsi que l'importance relative de la pièce par rapport aux pièces réalisées à chaque couche. Dans le cas 3, la durée de la phase de réalisation des couches peut être répartie équitablement

entre les 5 pièces, puis pour les couches se situant au-dessus de 30 mm suivant l'axe Z, la durée de fabrication n'est plus associée qu'à la pièce parallélépipédique qui est la seule fabriquée.

Nous avons adopté la seconde approche lors de nos travaux. Les durées, et les coûts de revient déterminés à partir de ces durées, sont des estimations qui prennent en compte l'orientation des pièces et leur surface relative. La durée de réalisation d'une pièce est la somme des durées de fabrication de ses couches. Celles-ci sont directement proportionnelles au rapport entre la surface projetée du volume englobant (dans le plan (X,Y)) de la pièce et la somme des surfaces projetées des pièces réalisées dans la couche considérée (3.1).

$$d_i = \sum_j (t_{couchej} \cdot \frac{S_{ei}}{\sum_k S_{ek}}) \quad (3.1)$$

avec :

- d_i , la durée de fabrication des couches de la pièce i ,
- $t_{couchej}$, la durée de fabrication de la couche j ,
- S_{ei} , la surface projetée, dans le plan (X,Y), du volume englobant de la pièce i ,
- S_{ek} , la surface projetée, dans le plan (X,Y), du volume englobant de la pièce k qui fait partie des pièces fabriquées dans la couche j .

Les durées des autres opérations (préparation machine, mise sous vide, montée en température, refroidissement, etc) peuvent être divisées par le nombre de pièces et affectées à la durée de chaque pièce, ce que nous avons adopté. Il est possible de les affecter au prorata du volume des pièces par exemple, notamment lorsqu'une fabrication comprend des pièces de tailles très différentes.

Pour notre cas de fabrication hétérogène 3, la durée de fabrication totale d'une pièce cubique est alors d'environ 2h41¹ (3.2), celle de la pièce parallélépipédique étant de 10h19² (3.3). La durée totale de fabrication des pièces cubiques est donc plus faible que lors du cas 2 (pour lequel elle est environ 2h53).

$$d_{totalecube} \approx \frac{7h50}{5} + \frac{5h36}{5} \approx 2h41 \quad (3.2)$$

$$d_{totaleparallélépipède} \approx \frac{7h50}{5} + (\frac{5h36}{5} + 7h38) \approx 10h19 \quad (3.3)$$

Afin d'observer l'impact de l'orientation d'une pièce dans un contexte de productivité maximum, nous nous intéressons à deux autres cas de fabrication (Figure 3.24) :

- cas 6 : fabrication de 12 pièces parallélépipédiques pleines (30 mm * 30 mm * 90 mm) dont la plus grande dimension est placée horizontalement,
- cas 7 : fabrication de 36 pièces parallélépipédiques pleines (30 mm * 30 mm * 90 mm) dont la plus grande dimension est placée verticalement.

Les durées de fabrication se trouvent dans le tableau suivant :

1. En ne considérant que le volume englobant, on obtient une durée de 3h01
2. En ne considérant que le volume englobant, on obtient une durée de 9h02

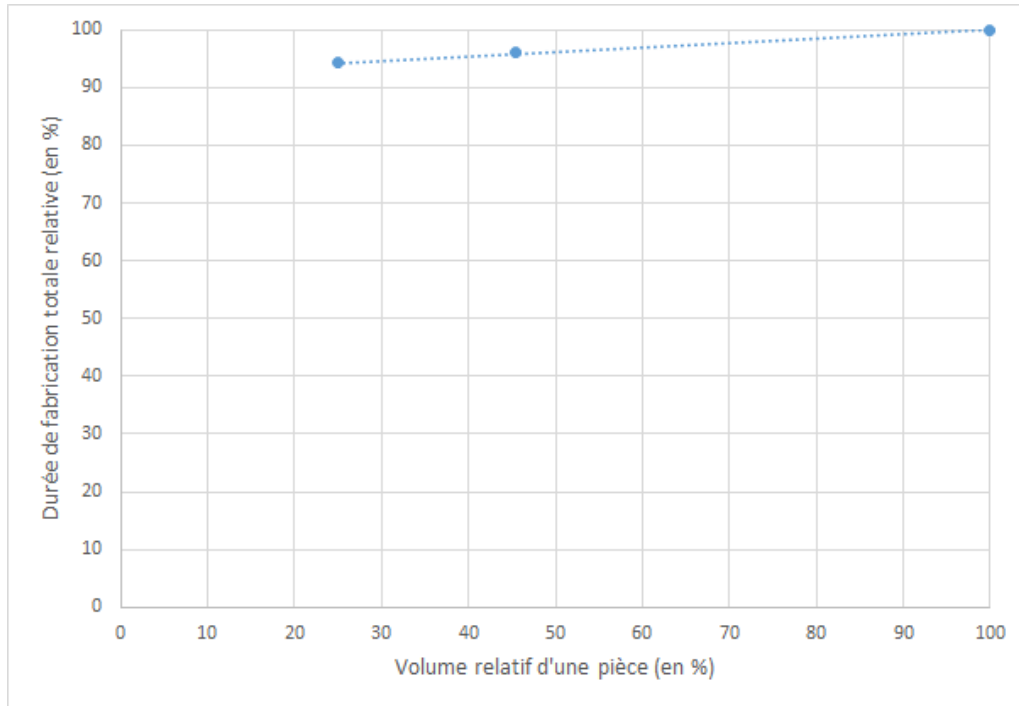


FIGURE 3.23 – Évolution de la durée de fabrication totale relative d’une pièce (en %) en fonction du volume relatif (en %) par rapport à une pièce cubique pleine, à volume englobant identique

Opération	cas 6	cas 7
Préparation numérique	15 min	15 min
Préparation machine	20 min	20 min
Mise sous vide	40 min	40 min
Alimentation en énergie	5 min	5 min
Réglage du faisceau	15 min	15 min
Préchauffe de la plaque	25 min	25 min
Réalisation des couches	15h57 ^a	50h22 ^b
Refroidissement	3h30	5h
Ventilation à l’air	10 min	10 min
Sortie lot	30 min	30 min
Dépoudrage	10 min	10 min
Durée totale	22h17	58h12
Durée par pièce	1h51	1h37

^{a.} ≈ 96 s par couche pendant 600 couches

^{b.} ≈ 101 s par couche pendant 1800 couches

La durée de réalisation des couches est plus longue dans le cas 7 que dans le cas 6, cette différence est causée par la différence de longueur des contours (4320 mm contre 2160 mm), alors que les surfaces balayées sont les mêmes (32400 mm²). Malgré cela, la durée de fabrication totale est plus faible pour le cas 7, car les opérations pré et post-

fabrication sont réparties sur un plus grand nombre de pièces.

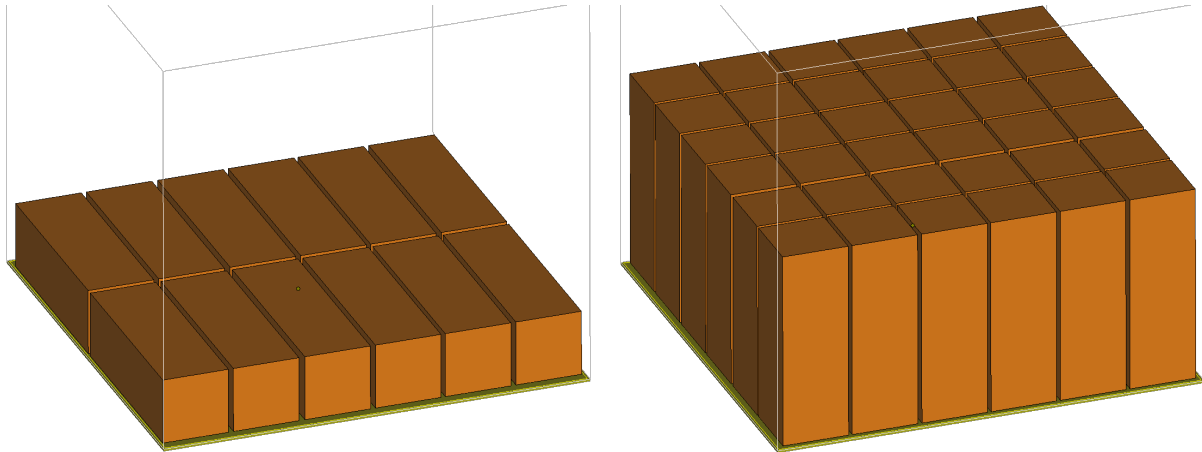


FIGURE 3.24 – Cas de fabrication de 12 parallélépipèdes réalisés horizontalement, cas 6 à gauche, et de 36 parallélépipèdes verticalement, cas 7 à droite.

Relation entre géométrie et durée de fabrication Nous avons vu que la durée de fabrication d'une pièce dépend principalement de sa hauteur suivant l'axe vertical ainsi que de son volume englobant. A volume englobant constant, une diminution du volume de la pièce conduit à une diminution légère de la durée de fabrication (Figure 3.23). Lors de la fabrication simultanée de plusieurs pièces, la durée de fabrication d'une pièce peut être diminuée en utilisant des formes qui permettent la réalisation d'un plus grand nombre de pièces dans le volume de fabrication.

3.4.2 Coût de revient des pièces

Nous nous intéressons ici au coût de revient des pièces réalisées par EBM et plus particulièrement au coût de fabrication. Nous voulons montrer l'impact de la conception sur le coût des pièces.

Modèle de coût A partir d'un modèle de coût de revient technique pour les procédés traditionnels issu d'une notice des Techniques de l'Ingénieur [FDC99], nous avons proposé un modèle de calcul de coût pour les pièces réalisées par EBM (Annexe B).

$$C_{revient} = C_{prepa} + C_{matiere} \cdot M_{matiere} + t_{machine} \cdot (C_{amortissement} + C_{energie}) + t_{operateur} \cdot CS + C_{depoudrage} + C_{sous-traitance} \quad (3.4)$$

Le coût de revient technique (3.4) dépend des :

- C_{prepa} : le coût de préparation de la fabrication qui comprend l'amortissement des licences informatiques, la main d'œuvre, etc (en €), $C_{prepa} = t_{prepa} \cdot CS$,
- CS : le coût horaire chargé de la main d'œuvre,
- $C_{matiere}$: le coût massique de la matière première (en €/kg) ³,

3. Le coût massique de la poudre d'alliage de Ti6Al4V que nous utilisons est d'environ 200€/kg

- $M_{matiere}$: la masse de matière consommée qui dépend du volume de matière consommé (par la pièce, par les supports et environ 5% de matière perdue) ainsi que de la masse volumique de l'alliage,
- $t_{machine}$: la durée d'utilisation de la machine (en h),
- $C_{amortissementetloyer}$: le coût horaire, qui comprend l'amortissement de la machine et le loyer (en €/h),
- $C_{energie}$: le coût de consommation d'énergie horaire (en €/h) calculé à partir du prix de l'énergie et de la consommation moyenne de la machine,
- $t_{operateur}$: la durée de travail de l'opérateur pour préparer, nettoyer et régler la machine,
- $C_{depoudrage}$: le coût de l'opération de dépoudrage (en €),
- $C_{sous-traitance}$: le coût de la sous-traitance éventuelle (en €).

$C_{amortissementetloyer}$ dépend du loyer, des frais de maintenance et de l'amortissement de la machine. Cet amortissement est calculé à partir du prix d'achat de la machine et de la stratégie d'amortissement. Dans notre cas, nous considérons dans un contexte industriel que $C_{amortissementetloyer} \approx 150\text{k€}/\text{an}$ (pour notre machine EBM, modèle A1). En faisant l'hypothèse que la machine fonctionne 160 jours/an, nous obtenons $C_{amortissementetloyer} \approx 40\text{€/h}$. Pour la consommation énergétique, nous considérons qu'elle se situe en moyenne à 80% de la puissance maximale en fonctionnement, donc $C_{energie} = 4\text{kW} \cdot 0,12\text{€/kWh} \approx 0,5\text{€/h}$. Nous pouvons admettre que la durée de travail de l'opérateur est identique à chaque fabrication, étant donné qu'il effectue des opérations dont la durée est normalement fixe. Nous avons alors $t_{operateur} \approx 2\text{h}30$. Le coût opérateur par fabrication est donc (en faisant l'hypothèse d'un salaire horaire chargé à 3000€/mois) d'environ 50€/fabrication.

En conséquence, nous obtenons le coût de revient de l'équation (3.5).

$$C_{revient} = C_{prepa} + C_{depoudrage} + C_{sous-traitance} + 200\text{€/kg} \cdot M_{matiere} + t_{machine} \cdot (40\text{€/h} + 0,5\text{€/h}) + 50\text{€} \quad (3.5)$$

Pour obtenir le coût de revient technique d'une pièce (3.6), la durée de fabrication déterminée précédemment est introduite, et les opérations de préparation, dépoudrage et sous-traitance sont ramenées à une pièce. La contribution de chaque pièce est calculée sans pondération, dans le cadre d'une fabrication de pièces de taille très différentes, il est possible de pondérer cette contribution par rapport au volume englobant de chaque pièce, par exemple. Le nombre de pièces fabriquées simultanément est noté nb_{pieces} . La durée d'utilisation machine est décomposée entre la phase de réalisation des couches (notée $t_{couchej}$), et les phases de montée en température, mise sous vide, refroidissement, etc (notées t_{commun}).

$$C_{revient/piece} = \frac{C_{prepa} + C_{depoudrage} + C_{sous-traitance}}{nb_{pieces}} + 200\text{€/kg} \cdot M_{matiere} + \left(\sum_j (t_{couchej} \cdot \frac{S_{ei}}{\sum_k S_{ek}}) + \frac{t_{commun}}{nb_{pieces}} \right) \cdot (40\text{€/h} + 0,5\text{€/h}) + \frac{50\text{€}}{nb_{pieces}} \quad (3.6)$$

En reprenant les différents cas de fabrication précédents (Figure 3.22), nous obtenons les coûts unitaires suivants (sans prendre en compte C_{prepa} , et $C_{sous-traitance}$) :

Élément	cas 1	cas 2	cas 3	cas 4	cas 5	cas 6	cas 7
Matière	24 €	24 €	24 € et 72 €	6 €	13 €	72 €	72 €
Main d'œuvre	50 €	12,5 €	10 € et 10 €	12,5 €	12,5 €	4,2 €	1,4 €
Durée machine	9h44	2h47	2h41 et 10h19	2h36	2h40	1h49	1h36
Coût machine	394 €	113 €	109 € et 418 €	106 €	108 €	73 €	64 €
Dépoudrage	3 €	3 €	3 €	3 €	3 €	3 €	3 €
Coût d'une pièce	471 €	152 €	146 € et 503 €	127 €	136 €	152 €	140 €

Le calcul du coût des pièces exemples montre le poids important de l'utilisation de la machine par rapport aux autres coûts et notamment au coût matière, lors de la réalisation de petites pièces en faible nombre. Pour les cas 6 et 7, malgré la fabrication de pièces denses très massives les coûts d'utilisation de la machine représentent moins de 50% du coût de revient des pièces grâce à l'utilisation de l'ensemble de la surface de fabrication.

Relation entre géométrie et coûts de fabrication Nous avons précédemment vu l'impact de la géométrie sur la durée de fabrication. Le coût de la pièce dépend du coût de la matière première (proportionnel au volume de la pièce), du coût d'utilisation de la machine (dépendant principalement de la hauteur puis du volume englobant), du coût de préparation (lié à la durée de réalisation des supports par exemple), du coût de dépoudrage (dans le respect des préconisations présentées précédemment) et des coûts de finition. A volume englobant et orientation fixes, minimiser la masse revient à minimiser le coût, tant que cela n'entraîne pas d'opérations de préparation ou de parachèvement supplémentaires.

3.5 Conclusion

A partir des spécificités du procédé additif EBM, nous avons identifié des facteurs qui influent sur la conception des pièces. Nous avons ensuite caractérisé expérimentalement l'opération de dépoudrage et montré la relation géométrique entre les dimensions des volumes à dépoudrer et la quantité de poudre qu'il est possible d'enlever. Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés à la problématique thermique. Nous avons mis en évidence le phénomène de déformation thermique et montré l'impact de l'orientation des surfaces et des volumes sur l'amplitude de la déformation thermique. Nous avons présenté les deux outils qui permettent aujourd'hui d'éviter les déformations : les fonctions de compensation et l'utilisation de supports. Ces deux outils ont des inconvénients, celui de voir apparaître des porosités en diminuant la quantité d'énergie apportée pour les fonctions de compensation et celui de consommer de la matière première et de la main d'œuvre pour retirer les supports pour le second.

Nous avons ensuite considéré la qualité des pièces réalisées. Nous avons montré par des mesures expérimentales que la qualité des surfaces est grossière et qu'elle dépend de l'orientation de ces surfaces. La dispersion dimensionnelle est forte, de l'ordre de plusieurs dixièmes de millimètres. L'erreur moyenne, qui peut être corrigée lors du calibrage de la machine, est du même ordre de grandeur. Enfin, nous avons vu que le matériau réalisé possède des propriétés mécaniques qui répondent aux standards pour les pièces moulées.

Nous avons discuté de la notion de temps de fabrication d'une pièce en fabrication additive, notamment dans le cadre de la réalisation simultanée de pièces différentes. Nous avons ensuite proposé un modèle de coût des pièces réalisées en EBM, basé sur un modèle destiné aux moyens de fabrication traditionnels. L'influence de la géométrie sur la durée de fabrication et sur le coût a été présentée.

Nous avons donc explicité de nombreux phénomènes qui retentissent sur la fabrication, et donc sur la conception des produits. Ces phénomènes ne sont aujourd'hui pas pris en compte lors de la phase de conception. Ils provoquent des non-conformités et une augmentation du délai d'industrialisation des pièces et de leur coût. Nous allons voir dans le chapitre suivant comment il est possible de tenir compte de ces phénomènes pour concevoir des pièces. Plus généralement nous montrerons comment intégrer l'évolution du domaine des possibles en conception, dans le cadre de la fabrication à l'aide d'un moyen EBM.

Chapitre 4

Démarche de conception de produits fabriqués par EBM

4.1 Introduction

Nous avons vu dans l'étude bibliographique que les concepteurs manquent d'outils d'aide à la conception qui considèrent les spécificités des procédés de fabrication additive par couches. L'évolution du domaine des possibles en conception de produit que nous avons évoquée lors du chapitre 2, n'est aujourd'hui pas prise en compte dans les outils et méthodes disponibles. Les concepteurs continuent majoritairement à concevoir des pièces ne permettant pas une utilisation optimale de cette technologie de fabrication.

Dans le chapitre 3, nous avons identifié trois contraintes de fabrication principales pour le procédé EBM : la problématique thermique qui peut engendrer des déformations, celle de la qualité des pièces et la nécessité d'enlever la poudre non-fondue. Nous nous sommes également intéressés à l'impact de la conception sur le délai et le coût d'obtention des pièces.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la démarche de conception développée pendant le travail de thèse. Cette démarche prend en compte l'évolution du domaine des possibles en conception, et permet la génération de formes nouvelles tout en respectant les contraintes de fabrication explicitées au chapitre précédent.

Nous reviendrons, dans un premier temps, sur les problèmes spécifiques à résoudre, ainsi que sur le domaine de validité de la démarche proposée. Dans un deuxième temps, nous présenterons la démarche de conception en détaillant ses différentes étapes. Nous traiterons ensuite un cas d'étude de reconception de pièce (un deuxième cas d'application est dans l'annexe C), illustrant l'utilisation de la démarche proposée. Avant de conclure, nous critiquerons la démarche proposée et discuterons de ses limites.

4.2 Contexte

Avant de présenter la démarche de conception, nous allons définir son domaine d'application ainsi que les pré-requis qu'elle nécessite. Nous rappellerons ensuite les différents points importants que cette démarche doit aborder pour exploiter pleinement les possibilités offertes par le procédé EBM.

4.2.1 Domaine d'étude

Conception de pièce La démarche proposée traite de la conception ou de la reconception de pièces. Elle permet de traiter pièces, et ensembles de pièces rigides. Elle ne peut cependant pas être appliquée aux mécanismes présentant des mobilités. Nous discuterons de ce sujet et présenterons les réflexions relatives à l'impact des procédés additifs sur la conception de mécanismes, dans les perspectives de ce travail de thèse.

Caractérisation des besoins La démarche que nous présentons ici nécessite que les besoins soient décrits dans un cahier des charges fonctionnel. Il est particulièrement important que le comportement attendu de la pièce ou de l'assemblage soit correctement défini.

Procédé considéré Les méthodologies de conception analysées lors de l'étude bibliographique ne considèrent généralement pas les contraintes de fabrication des procédés

additifs. L'un des objectifs de la démarche est la prise en compte des contraintes de fabrication du procédé EBM, précédemment explicitées. Nous évoquerons ultérieurement sa pertinence et son intérêt pour d'autres types de procédés de fabrication additifs.

Opérations de parachèvement Nous avons vu précédemment que la qualité des pièces réalisées par EBM n'est pas toujours suffisante pour répondre aux spécifications du produit. Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir recours à des opérations de parachèvement pour obtenir la qualité exigée. C'est, généralement, une opération de finition par usinage mécanique des surfaces spécifiées qui est mise en oeuvre. Il peut également s'agir d'usinage chimique qui vise à séparer les particules non-fondues et collées (problématiques lors de la réalisation de prothèses par exemple) ou à réduire la rugosité. Dans les deux cas, il est nécessaire de prévoir des surépaisseurs d'usinage tenant compte du volume de matière enlevé lors du parachèvement. Pour l'usinage, il faut également considérer l'accessibilité des surfaces. Notre démarche prend en compte à la fois la nécessité des surépaisseurs d'usinage et le besoin d'accessibilité.

4.2.2 Cahier des charges de la méthodologie de conception

La démarche proposée doit apporter des réponses à certaines limites, présentes actuellement, dans les démarches existantes.

Prise en compte des contraintes de fabrication Les contraintes de fabrication des procédés additifs sont insuffisamment considérées lors de la phase de conception. Les pièces générées peuvent être conçues pour d'autres procédés de fabrication. Ceci peut induire la nécessité d'opérations de finition supplémentaires et même conduire à l'impossibilité de réaliser les pièces. La démarche proposée doit prendre en compte les exigences du procédé et permettre d'anticiper les opérations de parachèvement éventuelles.

Utilisation des nouvelles possibilités Actuellement, les concepteurs rencontrent des difficultés à exploiter les possibilités offertes par les procédés de fabrication additive. Il s'agit de les aider, au-delà des freins psychologiques, à mieux appréhender ces procédés qui donnent des ouvertures sur la conception de formes nouvelles.

Optimisation de la géométrie La démarche proposée doit permettre de concevoir des pièces réalisables en fabrication additive. Ces pièces doivent répondre à un cahier des charges et être optimisées par rapport à un ou plusieurs critères, tels le coût ou la masse de la pièce. La démarche doit comporter une phase d'optimisation pour aboutir à une géométrie qui réponde au mieux aux exigences exprimées dans le cahier des charges fonctionnel.

4.3 Démarche de conception proposée

Notre démarche vise à l'obtention d'une géométrie théorique initiale, au choix du balancement de la pièce, puis à la reconception et l'optimisation des formes, pour prendre en compte les exigences du cahier des charges fonctionnel et du procédé. La figure 4.1

présente le schéma de principe qui récapitule les différentes étapes de la démarche, pour prendre en compte les changements observés du domaine des possibles en conception de produits amenés par le procédé EBM.

Dans un premier temps, le cahier des charges fonctionnel qui décrit les spécifications de la pièce est analysé. A partir de la description des surfaces fonctionnelles, du volume de conception et du comportement spécifié qui en sont extraits, une ou plusieurs formes initiales sont générées en se basant soit sur l'expertise du concepteur, soit sur l'utilisation d'outils d'optimisation topologique. Ces formes ne sont pas dimensionnées et peuvent être considérées comme la représentation d'une géométrie théorique initiale. Dans un deuxième temps, un ou plusieurs balancements sont déterminés ; il s'agit de choisir la ou les orientations de fabrication de la future pièce dans l'espace de la machine. Pour effectuer ce choix, le concepteur doit considérer la fabricabilité de la géométrie initiale d'un point de vue dimensionnel et thermique, la qualité réalisable à l'aide du procédé, ainsi que la productivité de la future fabrication. Une fois la pièce balancée, la géométrie initiale est adaptée pour prendre en compte l'ensemble des exigences du cahier des charges fonctionnel et du procédé ; elle est optimisée paramétriquement sous contraintes. Enfin, la ou les formes finales de la pièce sont validées : en vérifiant leur fabricabilité et le respect du cahier des charges fonctionnel, en prenant en compte les opérations de finition par l'ajout de surépaisseurs, et en positionnant éventuellement des structures supports. Cette démarche peut être itérative, le concepteur peut revenir à une étape précédente si une étape ne peut aboutir, ou s'il n'est pas satisfait du résultat de cette étape.

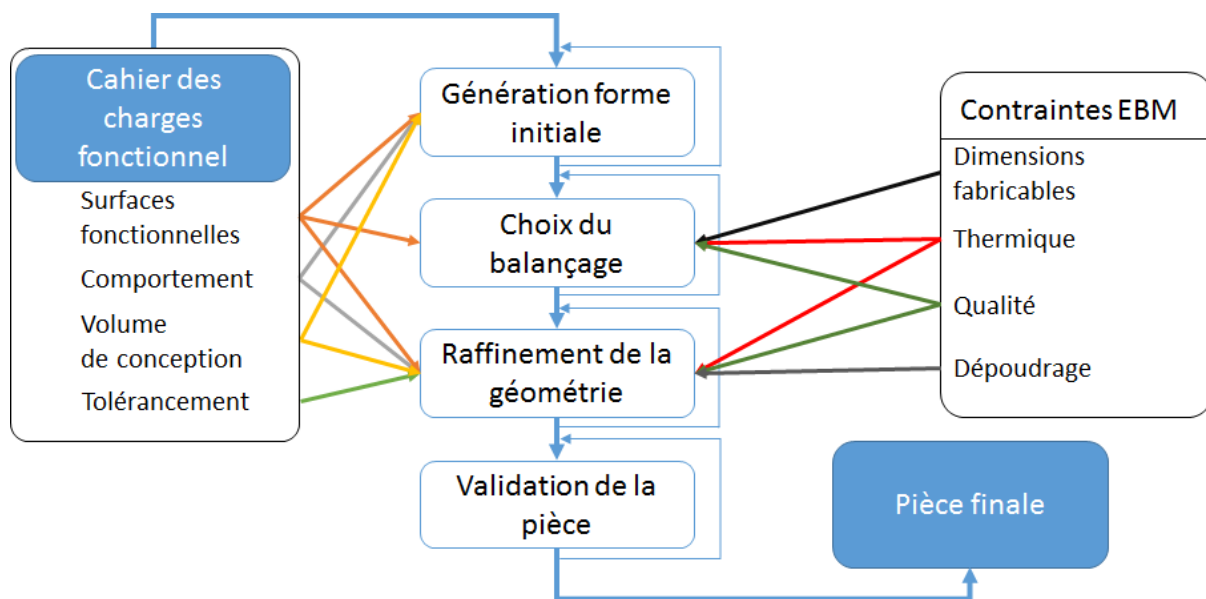


FIGURE 4.1 – Représentation schématique de la démarche de conception proposée. Les flèches pleines indiquent l'utilisation d'informations à une étape, les flèches pointillées représentent les retours possibles à une étape précédente.

4.3.1 Analyse des spécifications

La démarche de conception nécessite un cahier des charges fonctionnel qui définit les spécifications fonctionnelles auxquelles doit répondre la pièce. La première étape de cette démarche consiste à l'analyser, pour en extraire la liste des différentes surfaces fonctionnelles, la géométrie du volume de conception ainsi que la nature et les caractéristiques du comportement spécifié.

Surfaces fonctionnelles Les surfaces fonctionnelles (SF) sont les surfaces qui servent à réaliser une, ou plusieurs fonctions. Il peut s'agir de :

- surfaces en contact avec une autre pièce afin de réaliser une mise en position, un maintien en position ou un guidage,
- surfaces destinées à la manipulation ou à la préhension,
- surfaces sans contact assurant la protection, l'étanchéité ou une fonction d'esthétique,
- surfaces assurant le guidage de fluide,
- surfaces réalisant un échange thermique, etc.

Chaque surface fonctionnelle est décrite par sa forme et par sa position relative que l'on nomme habituellement contrainte de positionnement. Pour conserver une grande liberté dans la génération des formes, au cours des étapes conceptuelles suivantes, la géométrie des SF n'est pas à décrire obligatoirement de façon exhaustive. C'est particulièrement important en fabrication additive où les formes les plus basiques ne sont pas toujours les plus aisées à obtenir. Il n'est pas toujours nécessaire de réaliser des surfaces cylindriques de section circulaires par exemple. Il est possible d'utiliser des surfaces cylindriques dont la section est compatible avec la fonction réalisée, telles celles représentées sur la figure 4.2. Les informations qui permettent de dimensionner complètement la SF, dont la valeur de sa surface et sa géométrie, doivent cependant être définies afin de réaliser les calculs de dimensionnement (par exemple une pression surfacique maximale).

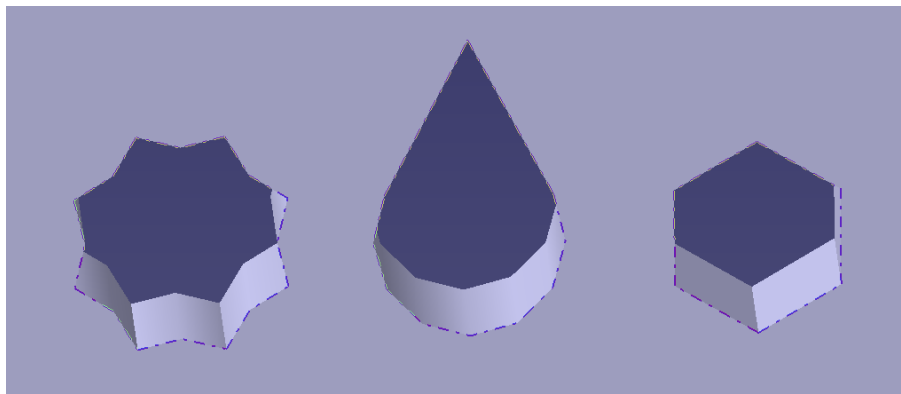


FIGURE 4.2 – Formes alternatives permettant de réaliser une fonction de glissement avec un axe cylindrique.

Pour les surfaces devant assurer une fonction d'étanchéité, la forme ne doit pas toujours être contrainte a priori et peut être déterminée par le volume de conception, les

exigences du cahier des charges fonctionnel et du procédé, ainsi que par le critère d'optimisation choisi. Elles doivent donc être décrites comme des surfaces quelconques. Leurs formes et leurs dimensions seront déterminées par calcul.

Volume de conception Une pièce mécanique fait généralement partie d'un sous-ensemble lui-même intégré à un produit. Lors de la conception, il est indispensable de s'assurer que chaque pièce n'entre en collision ni avec d'autres pièces, ni avec un fluide, ni avec les outils utilisés lors de l'assemblage du produit (par exemple). En considérant les différentes phases de vie du produit, il est possible de définir un volume de conception pour chaque pièce. Ce volume induit l'espace dans lequel la matière de la pièce doit obligatoirement se trouver.

Qualité de la pièce et opérations de finition Une fois les surfaces fonctionnelles et leurs relations géométriques décrites, des spécifications peuvent leur être associées. Ces spécifications concernent soit des états de surface ou des défauts de forme intrinsèques à une SF, soit des spécifications géométriques reliant des SF entre elles telles des spécifications d'orientation ou de localisation.

Si le moyen n'est pas suffisamment capable pour respecter les spécifications géométriques ou dimensionnelles décrites précédemment, il est nécessaire de prévoir des opérations de finition. Nous avons fait l'hypothèse que ces opérations sont réalisées par des moyens d'usinage, il faut prévoir les surépaisseurs d'usinage et assurer l'accessibilité de ces surfaces. Elle est prise en compte par la modification du volume de conception afin de garantir l'accès aux surfaces à usiner : le volume de conception est réduit afin que des volumes de la pièce n'empêche pas ces opérations.

Comportement spécifié La dernière information à extraire du cahier des charges fonctionnel concerne l'ensemble des données qui seront utilisées au cours du dimensionnement de la pièce. Il s'agit, généralement, de la description d'un ou plusieurs chargements mécaniques, thermiques ou couplés. Peuvent être ainsi spécifiés : des conditions aux limites en déplacements et en efforts sur des surfaces fonctionnelles, un critère de sécurité en lien avec la résistance du matériau (spécification d'un comportement mécanique). Il est également possible d'ajouter d'autres informations comme une masse maximale ou même un objectif de valeur de masse. Ces informations seront d'abord utilisées pour générer la topologie de la pièce. Elles serviront ensuite à dimensionner la pièce pour respecter les critères du cahier des charges.

4.3.2 Génération de formes initiales

Les informations issues du cahier des charges fonctionnel sont utilisées pour générer une ou plusieurs formes initiales de la pièce. L'objectif de cette étape est d'obtenir un ou plusieurs modèles géométriques tridimensionnels qui ne sont pas obligatoirement dimensionnés, les différentes entités géométriques étant dimensionnées par la suite. Cette phase est conduite par le concepteur se basant soit sur sa seule expertise, soit sur une approche guidée, soit en s'aidant d'outils d'optimisation topologique.

Approche conventionnelle Nous avons abordé précédemment les difficultés, pour certains concepteurs non guidés, de concevoir des pièces à réaliser par un moyen additif. Un expert peut toutefois établir une ou plusieurs formes qui seront utilisées dans la suite de la démarche de conception. La limite de cette approche est le risque d’une utilisation partielle de la liberté offerte et d’une reproduction de formes traditionnellement conçues.

Approche guidée Guider le concepteur, dans sa démarche d’élaboration de formes qui exploitent les possibilités des procédés additifs, peut l’aider à surmonter certains freins psychologiques. L’assistance consiste en la construction d’un squelette géométrique auquel on associera ensuite un modèle volumique (type de représentation utilisé pour la phase de conception préliminaire [TBT95]). Le squelette géométrique est une représentation des informations issues du cahier des charges fonctionnel. Il est construit en positionnant, dans un premier temps, les surfaces fonctionnelles les unes par rapport aux autres. Les informations relatives au positionnement des SF peuvent éventuellement figurer sur la représentation lorsque la position d’une SF n’est pas complètement définie, par exemple. Dans un second temps, seront intégrés le volume de conception et les conditions aux limites du chargement spécifié.

Ensuite sont figurés les différents champs de contraintes ou d’énergie qui relient les SF en respectant le volume de conception d’après le ou les chargements spécifiés. La géométrie volumique, le long des champs de contraintes, est ensuite décrite. Le concepteur choisit alors la géométrie la plus propice, pour répondre au chargement spécifié et tenir compte du ou des critères définis. Dans le cas d’une pièce en flexion, il peut suggérer une forme qui maximise le moment quadratique par exemple. La géométrie proposée est adimensionnée et doit laisser des degrés de liberté pour ne pas trop contraindre la forme dans l’étape ultérieure d’optimisation. Le concepteur peut choisir des géométries pleines ou légères telles que des treillis (voir cas d’études : paragraphe 4.4 et Annexe C).

Utilisation de moyens d’optimisation topologique L’étape d’obtention de la géométrie préliminaire est également réalisable par calcul. Sont alors utilisés des moyens d’optimisation topologique tels que ceux vus au chapitre 1. Notre usage de l’optimisation topologique se limite à celui d’outils existants. Nous n’entrerons pas dans le détail des codes de calculs qui appartiennent, par ailleurs, à des domaines de recherche actuels [WWBM10], [Las11].

Les outils d’optimisation topologique reposent sur le concept d’une densité calculée à partir de champs de contraintes. Les différents logiciels offrent des fonctions plus ou moins élaborées, allant de la visualisation des champs de contraintes à l’obtention d’une forme quasiment dimensionnée. Quel que soit l’outil informatique utilisé, le volume de conception, les surfaces fonctionnelles et au moins un cas de chargement doivent être définis dans le logiciel. Les données extraites du cahier des charge fonctionnel sont donc facilement exploitables.

Lors de ce travail de thèse, nous avons utilisés les logiciels suivants :

- Topostruct, un logiciel d’optimisation topologique gratuit développé par Sawako et Panagiotis [SP14],
- le module d’optimisation topologique de ANSYS [ANS14],
- Inspire [Eng14], un logiciel développé par Altair qui fait partie de la suite Hyperworks.

Ces logiciels utilisent tous la méthode d'homogénéisation ; les volumes sont associés à une densité de matériau à laquelle correspondent des propriétés mécaniques qui dépendent de cette densité. La théorie de l'homogénéisation permet de calculer la valeur optimale de la densité dans tous les éléments et la forme est obtenue en enlevant les zones de plus faible densité qui participent le moins à la résistance mécanique. Les résultats de l'optimisation ne sont pas exportables avec Topostruct contrairement aux deux autres logiciels qui peuvent exporter des fichiers volumiques discrétisés.

Quelle que soit la stratégie choisie pour la phase de créativité, et le logiciel utilisé dans le cas de l'optimisation topologique, les formes obtenues ne sont pas directement exploitables. Avant d'aboutir à une géométrie réalisable, il faut à la fois, la dimensionner en fonction des sollicitations et prendre en compte les exigences du procédé.

4.3.3 Choix du balancement des pièces

Les facteurs thermiques et de qualité développés au chapitre précédent dépendent de l'orientation de la pièce. Cet aspect impacte aussi la durée de fabrication des pièces, le nombre qu'il est possible de réaliser simultanément et donc leur coût. Il est donc nécessaire d'étudier le balancement de la pièce avant de réaliser une optimisation. Cette opération peut offrir des solutions multiples suivant les différents facteurs présents lors du choix de l'orientation de la pièce. Pour illustrer notre propos, nous allons considérer une pièce en forme de "L" (Figure 4.3) et plusieurs balancements sur ses différentes faces. Les différents aspects à considérer sont les suivants :

- dimensions de la pièce par rapport au volume fabricable,
- fabricabilité par rapport à la problématique thermique,
- délai d'obtention des pièces,
- coût de revient des pièces,
- qualité des surfaces.

Dimensions de la pièce Le balancement peut être imposé par les dimensions de la machine et par celles de la pièce à fabriquer. Les volumes souvent restreints des machines additives imposent parfois une ou plusieurs orientations de la pièce, afin qu'elle soit contenue dans le volume de fabrication (Figure 3.3). C'est particulièrement le cas pour les machines A2X qui disposent de volumes de fabrication beaucoup plus haut que large (350 mm suivant l'axe Z, et 200 mm suivant les axes X et Y). Il est possible de fabriquer des pièces ayant une longueur supérieure à la hauteur et au côté du volume de fabrication de la machine en la positionnant, par exemple, suivant la diagonale du cube du volume de fabrication. La réalisation des pièces ayant une grande dimension ainsi qu'une largeur et une épaisseur plus faible, devient alors possible au prix d'une durée de fabrication et d'une occupation du volume de fabrication importantes.

Fabricabilité Nous avons observé, dans le chapitre précédent, que l'inclinaison des surfaces par rapport à l'axe du faisceau avait un impact sur le facteur thermique et donc sur la fabricabilité des pièces. Les expérimentations présentées montrent l'intérêt d'éviter les volumes en porte-à-faux. Il faut tenir compte de ce facteur pour déterminer des orientations de pièce qui limitent le nombre et la taille des surfaces négatives, fonctionnelles ou non, pour éviter les risques de déformations thermiques et de présence de porosités.

Pour la pièce exemple en forme de "L" (Figure 4.3), les balançages "a" et "d" conduisent à la présence de surfaces négatives, ce qui rend plus complexe la fabrication de la pièce et nécessite des supports. Ces deux balançages sont à éviter.

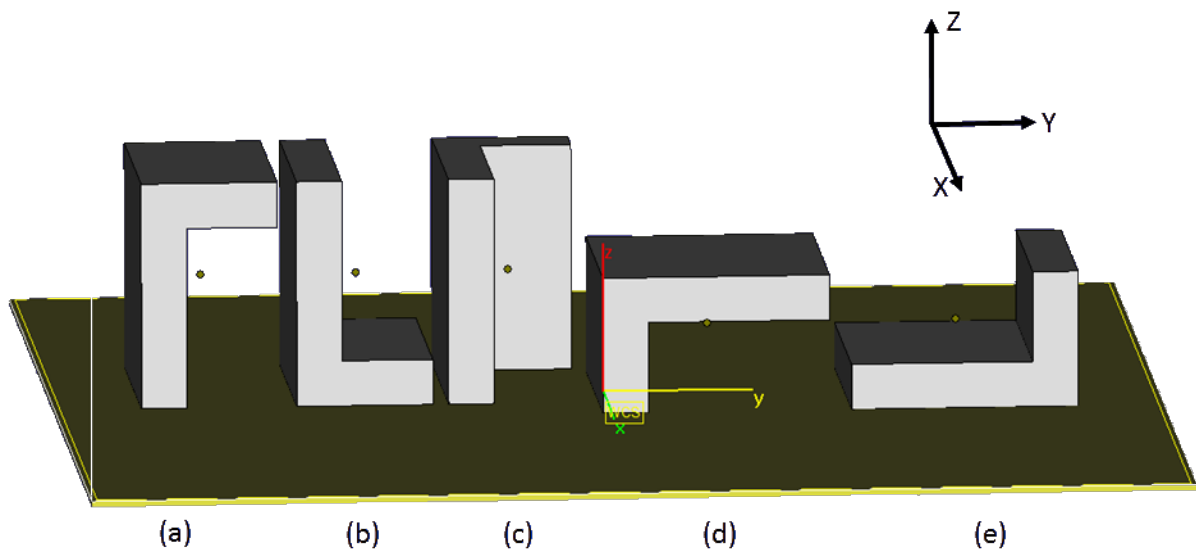


FIGURE 4.3 – Balançages possibles pour une pièce en forme de "L"

Durée de fabrication des pièces Lors de la réalisation d'une seule pièce ou lorsque cette pièce est la plus haute de toutes, l'orientation qui donne le temps de fabrication le plus court est celle qui minimise la hauteur suivant l'axe vertical. Dans le cas de notre exemple, il s'agit des orientations "d" et "e". Ce cas de figure n'est pas très probable dans un contexte industriel où la fabrication d'un maximum de pièces permet de réduire les coûts de revient des pièces.

Lors de la réalisation simultanée d'un lot de pièces identiques, plus le nombre de pièces réalisées est important, plus la durée de fabrication par pièce est réduite. Dans notre exemple, si les pièces ne sont pas superposées suivant l'axe vertical, le balancement qui permet de réaliser le plus de pièces est le "c".

Au cours de la fabrication d'un lot de pièces hétérogène, le balancement qui permet l'obtention du plus grand nombre de pièces est celui qui conduit à la plus faible durée de fabrication par pièce. Le choix de l'orientation de la pièce peut alors dépendre de la géométrie des autres pièces.

Coût de revient des pièces Le coût de revient d'une pièce dépend notamment du coût d'utilisation machine et du coût de main d'œuvre. L'influence de l'orientation des pièces sur leur coût de revient est liée à la fabricabilité (en raison du coût des opérations de parachèvement, usinage et enlèvement de supports) et à la durée de fabrication. Pour minimiser le coût de la pièce, il faut opter pour le meilleur compromis entre la fabricabilité et la durée de fabrication. Dans notre exemple, deux orientations, "c" et "e" répondent à ces critères suivant le contexte de la fabrication (fabrication du maximum de pièces pour le cas "c" ou d'un lot de petite taille pour le cas "e").

Qualité surfacique Le choix du balançage peut également être motivé par la différence d'état de surface et de planéité, suivant l'orientation des surfaces comme quantifié au chapitre 3. Pour discriminer deux balançages possibles, il peut être intéressant de choisir celui qui favorise une orientation positive, ou verticale, des SF. En l'absence de spécification, notre exemple ne peut illustrer cet aspect.

4.3.4 Raffinement de la géométrie

A ce stade de la démarche, le concepteur a choisi un ou plusieurs couples de forme initiale et de balançage. Les formes ne sont pas encore dimensionnées et les contraintes de fabrication ne sont pas complètement prises en compte. La première étape du raffinement de la solution va consister en une modélisation de la géométrie, en définissant un paramétrage de celle-ci. Dans un deuxième temps, la phase d'optimisation sera préparée en choisissant la plage de variation des différents paramètres, en fonction du cahier des charges fonctionnel et des contraintes de fabricabilité. Le critère d'optimisation et les contraintes associées doivent également être explicitées. Est ensuite réalisée une optimisation paramétrique sous contraintes de la géométrie de la pièce, qui utilise les informations relatives aux paramètres, aux sollicitations et au critère d'optimisation. Cette optimisation permet d'obtenir un jeu de paramètres qui décrit la géométrie.

Modélisation de la forme et paramétrage A l'issue de l'étape précédente, le concepteur dispose d'un modèle volumique adimensionné ou d'un résultat d'optimisation topologique. Dans ce dernier cas, suivant le logiciel utilisé, il possède soit une visualisation 3D qu'il ne peut exporter (Topostruct), soit un modèle discrétisé avec des volumes continus ou non (ANSYS et Inspire). Dans tous les cas, il est nécessaire de modéliser une géométrie exploitant les résultats de la phase de créativité, tout en prenant en compte la contrainte de fabricabilité (éviter les surfaces négatives et les volumes en porte-à-faux, prise en compte de la hauteur limite de dépoudrage économique). Cette modélisation peut nécessiter une adaptation importante comme nous le verrons dans le cas d'application. A ce stade, le concepteur peut effectuer des simulations pour valider une géométrie préliminaire.

Lors de cette modélisation, il doit définir un paramétrage de la géométrie afin que celle-ci puisse être dimensionnée par rapport aux chargements appliqués et que soient prises en compte les contraintes de fabrication. Le paramétrage doit être un compromis entre une description exhaustive de la géométrie, trop coûteuse en temps de calcul et une description trop limitée qui ne permette pas de trouver un dimensionnement de la pièce ou qui sur-contraigne la géométrie.

Bornage des paramètres Chaque paramètre défini précédemment doit être borné afin de limiter son domaine de variation lors de l'optimisation. Il est également nécessaire d'intégrer certaines contraintes de conception par ce moyen. Ainsi, le bornage des paramètres doit permettre de respecter les données suivantes :

- le bornage doit forcer les formes géométriques à toujours se trouver dans le volume de conception,
- l'orientation des surfaces négatives doit être limitée par rapport au plan horizontal (par exemple au moins 15° pour des épaisseurs de 1 mm),

- les épaisseurs les plus faibles doivent être d’au moins 0,6 mm,
- l’élancement des trous borgnes doit être au maximum un facteur 2 pour garantir un dépoudrage économique (et un facteur 4 pour les trous débouchants).

Le concepteur peut choisir de ne pas prendre en compte certaines contraintes, notamment celles relatives à l’orientation des surfaces ou à l’élancement des volumes creux qui contraignent fortement la géométrie. Cela peut néanmoins impliquer de positionner des structures supports ou d’effectuer des opérations supplémentaires de parachèvement une fois la pièce fabriquée.

Choix du critère d’optimisation Le concepteur doit choisir un critère d’optimisation qui sera maximisé, minimisé ou qui tendra vers une valeur cible. Le critère choisi doit permettre de répondre aux exigences du cahier des charges fonctionnel. Nous avons vu, au chapitre 3, qu’à volume englobant et balancement constants, plus la masse d’une pièce est faible, plus sa durée de fabrication et son coût sont faibles. Par conséquent, le critère de minimisation de la masse peut être choisi lorsque le cahier des charges fonctionnel n’impose pas un critère spécifique.

Définition des contraintes d’optimisation L’objectif de cette optimisation est le dimensionnement, ainsi que la prise en compte des contraintes de fabrication. En ce qui concerne le dimensionnement, on souhaite atteindre un optimum par rapport au critère choisi, tout en respectant les exigences du cahier des charges et du procédé.

La première contrainte d’optimisation concerne le dimensionnement. La définition de la contrainte consiste à choisir un ou plusieurs critères et à les comparer aux résultats du calcul par éléments finis afin de valider le dimensionnement de la pièce. Pour un chargement mécanique ou thermique, nous pouvons ainsi choisir de comparer le critère de Von Mises maximal à la limite élastique, la première fréquence propre de la pièce à une fréquence limite, un flux thermique à un maximal admissible, etc. Nous pouvons également contraindre une valeur maximale de déplacement suivant une direction spécifique, une température maximale ou moyenne, etc.

Il est également possible de définir des contraintes pour prendre en compte des exigences du procédé, comme la valeur de l’élancement des trous, l’orientation des plans ou les dimensions par rapport au volume de conception, si ces contraintes n’ont pas été prises en compte par le bornage des paramètres géométriques.

Optimisation paramétrique sous contraintes Une fois que les paramètres, le critère, le chargement et les contraintes d’optimisation sont définis, il est possible de réaliser l’optimisation de la géométrie de la pièce. Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous avons utilisé le module d’optimisation sous contraintes de Catia (*Product Engineering Optimizer*). Ce module nécessite, dans un premier temps, la création d’une simulation par éléments finis (maillage et conditions aux limites) qui valide les contraintes définies. À partir de ce résultat, des algorithmes différents peuvent être utilisés pour déterminer le jeu de paramètres optimal, le recuit simulé et une méthode de gradient. Le recuit simulé est un algorithme stochastique global qui converge vers un optimum local. Il est particulièrement efficace lorsque les objectifs et les contraintes sont non linéaires. Le gradient est un algorithme local qui détermine la direction de plus forte variation d’une fonction

(approximée par une fonction quadratique). Cet algorithme est très rapide pour des applications simples avec des fonctions à optimiser "simples". Il est possible de cumuler les deux algorithmes pour localiser la région de l'optimum par recuit simulé et déterminer précisément l'optimum par gradient.

Les contraintes d'optimisation définies précédemment demandent le calcul du comportement de la pièce par éléments finis, à chaque boucle d'optimisation car la géométrie est modifiée. Le coût en calcul peut donc être très lourd, en particulier lorsque de nombreux paramètres ont été définis avec de larges bornes. Le type et la taille du maillage est aussi très impactant sur le temps de calcul, surtout si la géométrie fine impose l'utilisation d'éléments finis de petite taille.

Afin d'obtenir des résultats pertinents avec un coût et une durée de calcul acceptables, il est nécessaire de trouver un compromis entre la bonne résolution des paramètres et du maillage ainsi qu'une résolution suffisamment faible pour limiter le temps de calcul. Il est également possible de faire évoluer le paramétrage et de verrouiller certaines géométries pour alléger le calcul. Les conditions de fin de calcul sont un nombre maximal d'itérations, un nombre maximal d'itérations sans amélioration du critère et une durée maximale pour l'opération d'optimisation.

Résultat d'optimisation Si le résultat ne satisfait pas le concepteur, il peut soit modifier le paramétrage de la pièce, soit modifier le balancage, soit modifier la forme initiale, pour obtenir une géométrie optimisée différente.

4.3.5 Validation de la pièce

Géométrie finale A l'issue de la phase d'optimisation, le concepteur dispose d'un jeu de paramètres qui définit la géométrie optimisée. S'il a choisi d'utiliser un maillage grossier pour minimiser le temps de calcul lors de la phase d'optimisation, il est nécessaire de valider la géométrie à l'aide d'une analyse par éléments finis avec un maillage fin.

Dans un second temps, la géométrie optimisée doit être modifiée pour considérer les surépaisseurs d'usinage. Lorsque des volumes fins sont particulièrement sollicités, le concepteur peut également appliquer une surépaisseur, par rapport aux dimensions obtenues par optimisation, pour prendre en compte la variation d'épaisseur (jusqu'à 0,2 mm d'après nos mesures de l'incertitude dimensionnelle). Si la géométrie comporte des structures très fines et optimisées par rapport aux cas de chargement, le concepteur peut se poser la question du comportement de la pièce sous des sollicitations non prévues, différentes des cas de chargement utilisés lors de l'optimisation paramétrique (voir Annexe C).

L'étape suivante est la vérification de la fabricabilité. Si certaines surfaces ne sont pas fabricables, des supports sont mis en place sur les surfaces négatives et au niveau des contours pour éviter les déformations thermiques. Ces supports sont soit à intégrer à la géométrie de la pièce, auquel cas le concepteur doit proposer une autre géométrie paramétrée, soit à enlever après la fabrication.

Validation de la géométrie La dernière étape de la démarche proposée consiste en la validation de la géométrie. Si plusieurs géométries de pièces ont été conçues à l'aide de la démarche proposée, leurs performances par rapport aux exigences du cahier des charges

fonctionnel et du procédé sont comparées afin de choisir la géométrie la plus pertinente. En l'absence de simulation de la fabrication pour les procédés additifs métalliques, l'intégrité de la matière ne peut être validée a priori. Dans le cadre de la fabrication d'une série de pièces, un prototype peut être réalisé afin de valider la fabricabilité de la géométrie et éventuellement d'affiner la position et la densité des supports par exemple.

4.4 Cas d'étude : équerre aéronautique

Afin d'illustrer la démarche de conception proposée, nous allons l'appliquer à la reconception d'une pièce mécanique existante. Toutes les étapes de la démarche seront suivies, de l'analyse du cahier des charges jusqu'à la réalisation de la pièce. Chaque étape sera illustrée à l'aide de notre cas d'étude qui sera présenté dans un premier temps. Nous illustrerons la possibilité d'obtenir la géométrie initiale, soit directement par le concepteur, soit par l'utilisation d'outils d'optimisation topologique.

4.4.1 Pièce étudiée

La pièce étudiée est une équerre utilisée dans un contexte aéronautique (Figure 4.4). Il s'agit d'une pièce qui réalise une liaison complète entre deux éléments de structure d'un avion. Les interfaces pour cette liaison sont deux surfaces planes disposant chacune de huit alésages qui permettent l'utilisation de 16 vis pour assurer le maintien en position des différentes pièces. Un effort réparti de 10 kN, perpendiculaire à la surface, est appliqué en fonctionnement sur une des deux faces. La déformation maximale ne doit pas dépasser 0,5 mm et le dimensionnement de la pièce respecter un coefficient de sécurité de 2.

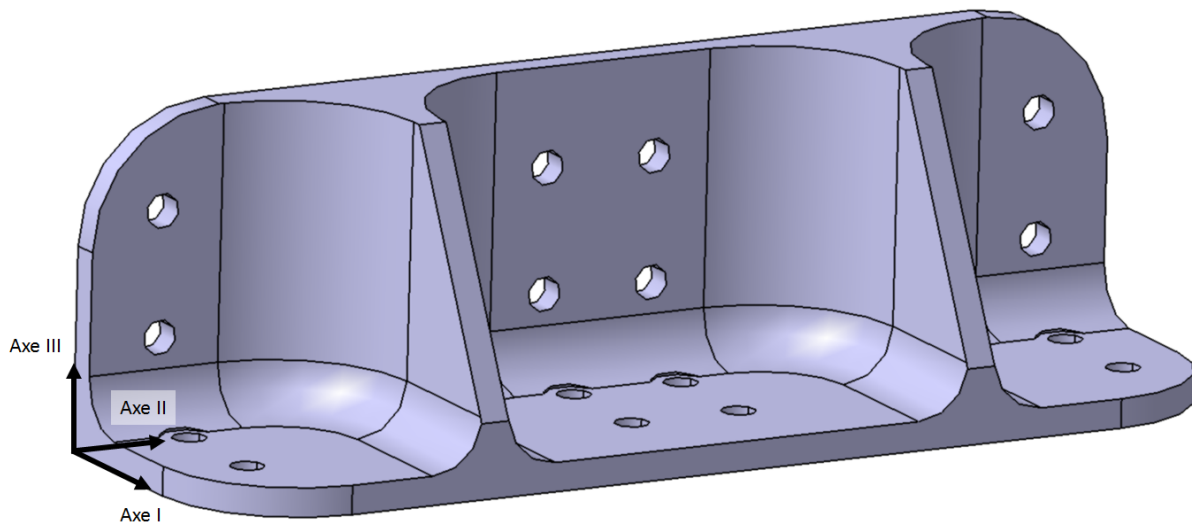


FIGURE 4.4 – Représentation de l'équerre aéronautique réalisée par usinage et de son repère

Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium aux applications aéronautiques, le 7075-T6. Les propriétés mécaniques de cet alliage sont très intéressantes avec une limite élastique et un module de Young importants :

Limite élastique	R_e	503 MPa
Limite mécanique	R_m	572 MPa
Allongement à la rupture	$A\%$	11%
Module de Young	E	72 GPa
Densité	d	2,81

La pièce est actuellement usinée dans la masse. Ses formes sont typiques des pièces usinées, notamment les deux nervures. La pièce est réalisée en deux phases d'usinages et a une masse de 52 g. Elle doit être reconçue en vue d'une fabrication avec le procédé EBM à partir de poudre de Ti6Al4V. La pièce doit être contenue dans un volume parallélépipédique (de dimensions 27 mm * 95 mm * 29 mm dans le repère (I,II,III) défini sur la figure 4.4). Le dimensionnement de la pièce doit tenir compte du chargement réel de la pièce en respectant la contrainte sur la déformation maximale et en utilisant un coefficient de sécurité de 2. Les interfaces de la pièce avec les deux pièces adjacentes doivent être conservées tout comme le montage à l'aide des seize vis.

4.4.2 Analyse du cahier des charges fonctionnel

La première étape de la démarche proposée est l'analyse du cahier des charges fonctionnel pour en extraire les informations relatives aux surfaces fonctionnelles, aux spécifications géométriques, au volume de conception et au comportement spécifié. La figure 4.5 synthétise les différentes informations (mises à part les spécifications).

Les surfaces fonctionnelles de la pièces sont les deux surfaces planes en contact avec les pièces adjacentes, les seize surfaces planes sur lesquelles viennent s'appuyer les têtes de vis et les seize surfaces cylindriques qui permettent le passage des corps de vis. Les positions relatives des SF sont identiques à celles de la pièce initiale.

Les spécifications géométriques ne sont pas toujours explicitées de manière exhaustive dans le cahier des charges fonctionnel. Dans notre cas, l'orientation relative des deux surfaces planes est spécifiée avec un intervalle de tolérance de 0,1 mm, leur planéité est spécifiée avec un intervalle de 0,05 mm. La position des deux groupes de trous est également spécifiée pour garantir le montage de la pièce sur les deux pièces adjacentes (avec un intervalle de tolérance de 0,2 mm). Au vu des différents intervalles de tolérance, les spécifications géométriques ne peuvent être obtenues directement par EBM. Il est donc nécessaire de réaliser une opération de parachèvement par usinage à l'issue de la fabrication.

Le volume de conception pour notre pièce est un volume parallélépipédique de dimensions 95 mm * 29 mm * 27 mm. Afin de prendre en compte les opérations de parachèvement, le volume de conception doit permettre l'accès aux deux grandes surfaces fonctionnelles ainsi qu'aux alésages (les surfaces d'appui des têtes de vis ne sont pas parachevées). Par ailleurs, les contraintes de montage et de démontage des vis restreignent le volume de conception en réservant un cylindre coaxial aux surfaces cylindriques. Celui-ci présente un diamètre légèrement supérieur à celui des têtes de vis (ϕ 7 mm), afin de permettre le positionnement et le vissage.

Enfin, le chargement spécifié dans le cahier des charges fonctionnel est un chargement mécanique statique, avec une charge répartie de 10 kN, appliquée sur une des deux faces,

alors que la seconde est considérée comme encastrée. Le déplacement maximal et un coefficient de sécurité sont spécifiés (respectivement 0,5 mm et 2).

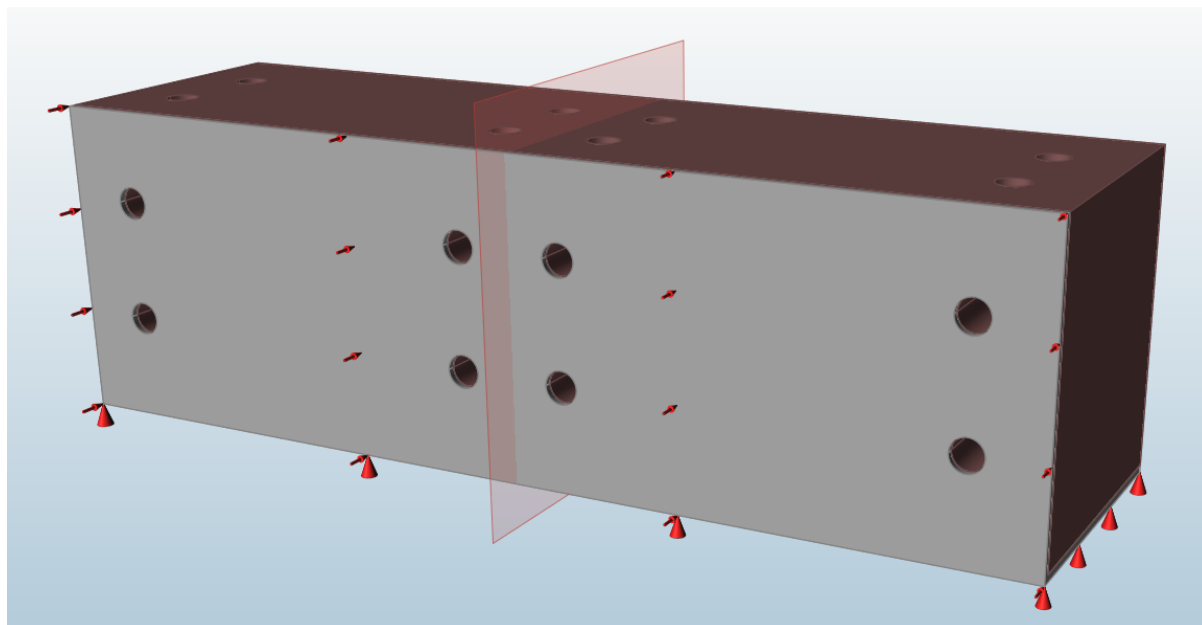


FIGURE 4.5 – Représentation des surfaces fonctionnelles, du chargement et du volume de conception de l'équerre

4.4.3 Génération de formes initiales

Lors de ce travail de reconception, nous avons généré des formes initiales en suivant deux approches : l'approche guidée qui exploite la représentation du squelette de la pièce, ainsi que celle qui met en œuvre des outils d'optimisation topologique.

Approche guidée Cette approche consiste à représenter dans un premier temps le squelette de la géométrie, le chargement et le volume de conception (Figure 4.6). Ensuite, une géométrie qui relie les surfaces fonctionnelles en suivant les flux d'efforts tout en restant dans le volume de conception est choisie. Ici, les flux d'efforts relient les deux surfaces fonctionnelles de grandes dimensions. Il est donc nécessaire de choisir une géométrie qui se trouvera entre ces deux surfaces fonctionnelles : matière dense, treillis, géométrie fine, etc.

Nous avons opté pour une géométrie fine avec une section constante, suivant sa longueur, afin d'avoir des zones de déformation maximale réparties de manière homogène, ainsi que pour avoir différents choix pour le balancement de la pièce. Cette géométrie est composée de cinq voiles minces, ce nombre ayant été déterminé grâce à plusieurs calculs de pré-dimensionnement par éléments finis, en faisant varier le nombre de voiles (Figure 4.7).

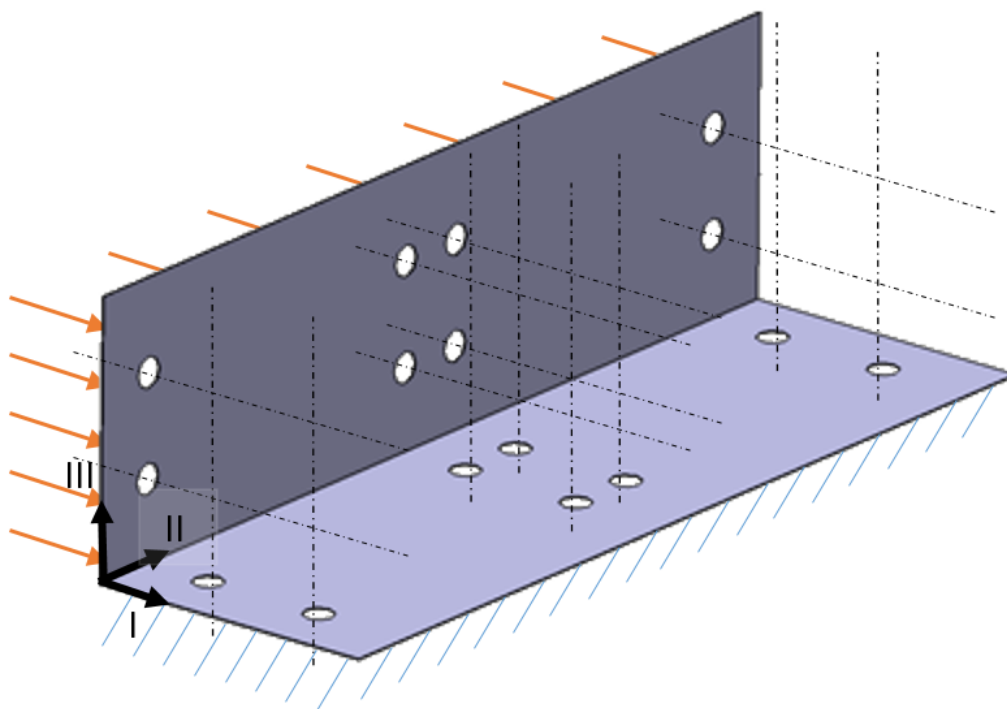


FIGURE 4.6 – Représentation partielle du squelette de la géométrie

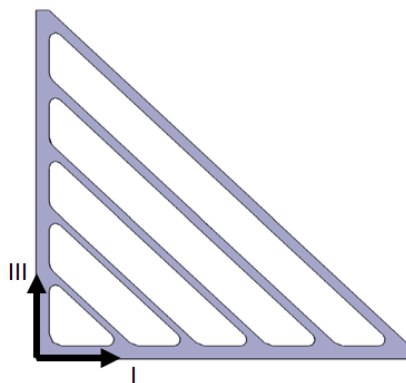


FIGURE 4.7 – Section de la pièce choisie par le concepteur

Optimisation topologique En parallèle de l'approche guidée, nous avons généré des géométries initiales en utilisant les logiciels d'optimisation topologique Topostruct et Inspire. Les informations nécessaires à la réalisation de cette optimisation sont la définition des surfaces fonctionnelles, des sollicitations, des conditions aux limites en déplacement, du volume de conception et de la taille du maillage (Figure 4.5).

Les résultats obtenus diffèrent de la forme choisie par le concepteur, comme le montrent les modèles sur la figure 4.8. Les formes obtenues par optimisation présentent des sections variables, suivant la longueur de la pièce, ainsi qu'un nombre de voiles réduit.

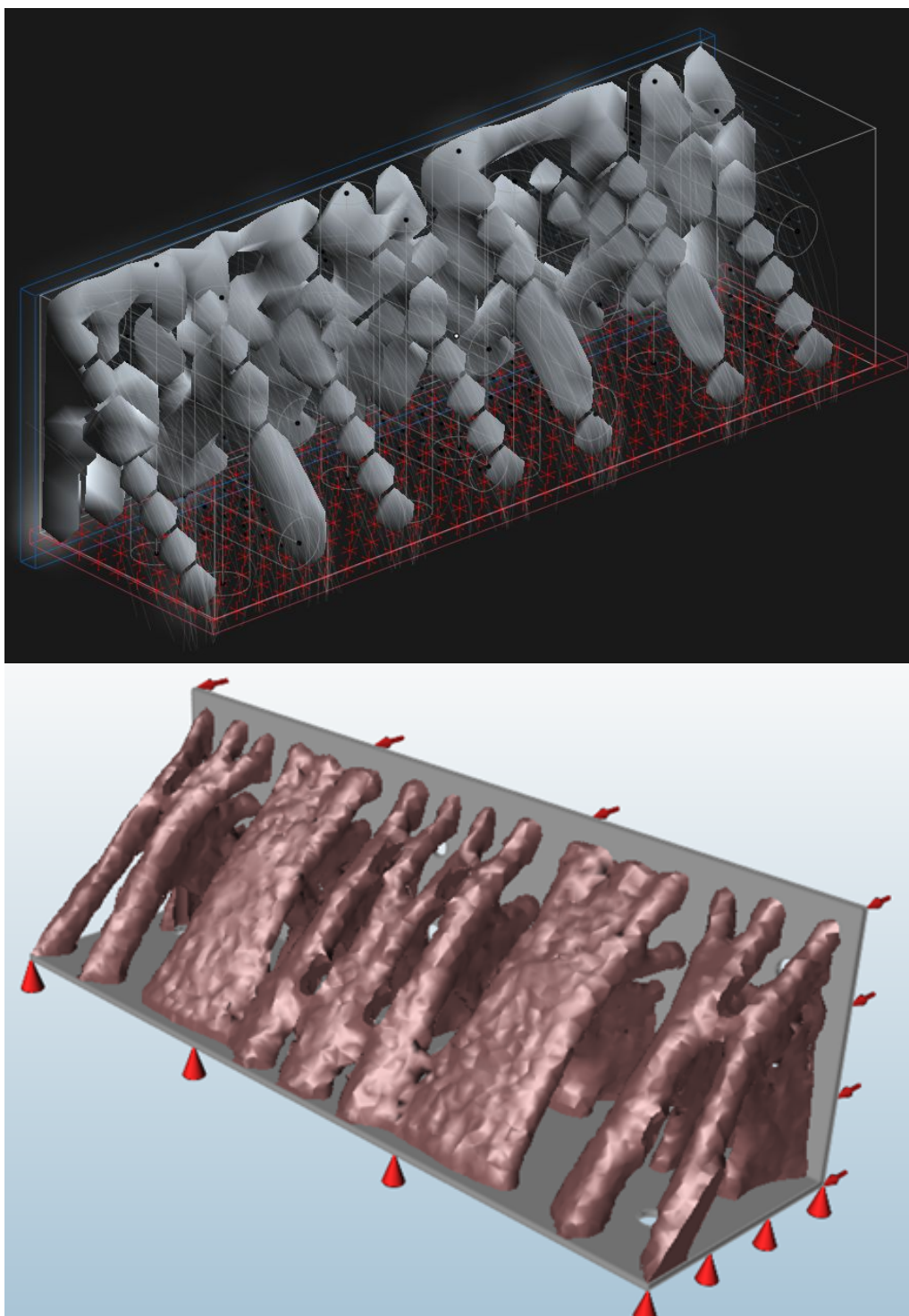


FIGURE 4.8 – Formes obtenues par optimisation topologique à l'aide du logiciel Topos-
truct (en haut) et Inspire (en bas)

4.4.4 Choix du balancement des pièces

Approche guidée La forme initiale choisie par le concepteur peut être fabriquée aisément, suivant trois posages différents : avec les plan (I,III), (II,III) ou (I,II) en contact avec la plaque de départ (cas "a", "b" et "c" sur la figure 4.9). Ces trois orientations conduisent en effet à une orientation maximale des surfaces négatives d'environ 45° pour les cas "b" et "c", et des surfaces négatives limitées aux surfaces cylindriques pour le cas "a". Les orientations "b" et "c" offrent la possibilité de fabriquer 12 pièces simultanément (avec une hauteur de 27 ou 29 mm) alors que l'orientation verticale permet d'en réaliser 60 (de 95 mm de haut). L'orientation "a" permet de réaliser 5 fois plus de pièces simultanément, les durées des opérations de préparation et de refroidissement sont effectuées pour un plus grand nombre de pièces, le coût unitaire des pièces sera donc plus faible. Notre choix s'est porté sur l'orientation "a" qui permet d'avoir le coût unitaire le plus bas et qui évite, quasi totalement la présence de surfaces négatives.

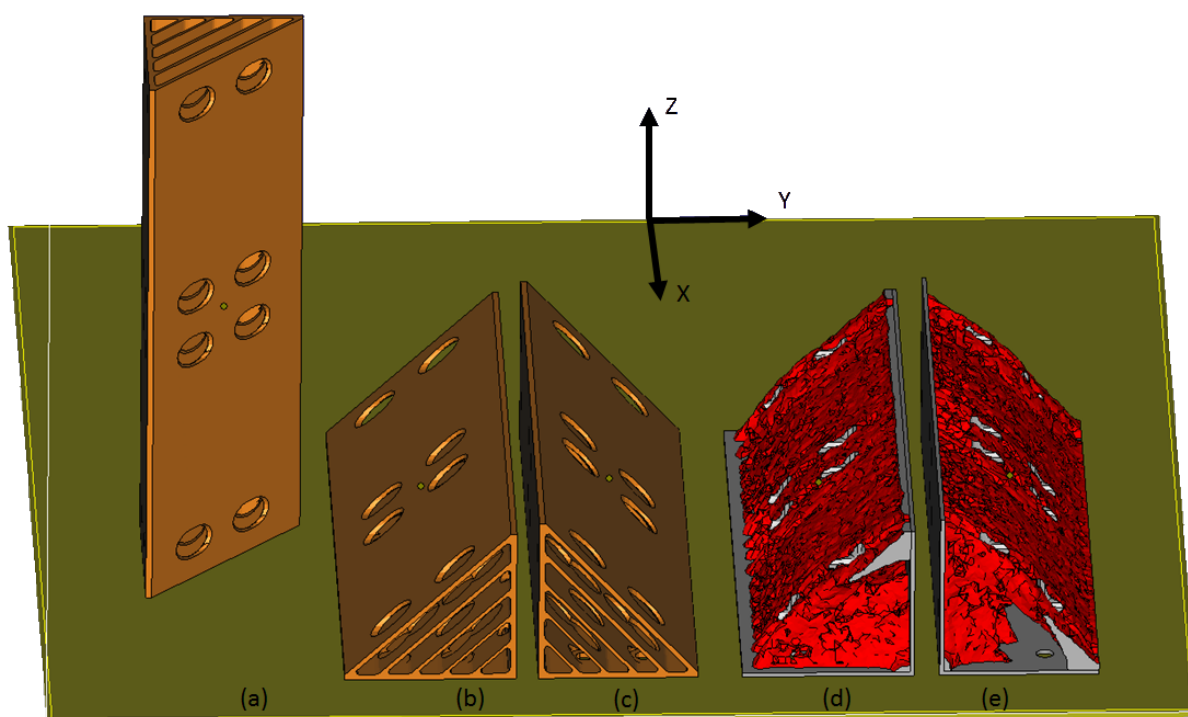


FIGURE 4.9 – Balancements des formes initiales obtenues par l'approche guidée (a, b et c) et l'optimisation topologique (d et e)

Optimisation topologique La pièce issue de l'optimisation topologique présente des volumes en porte-à-faux si elle est réalisée verticalement. Seules les deux orientations, "d" et "e" (Figure 4.9), permettent une fabrication qui ne nécessite pas de supports. Elles autorisent toutes deux la réalisation du même nombre de pièces simultanément, avec cependant une différence de hauteur : 27 mm pour l'orientation "d" ou 29 mm pour "e". Nous choisissons l'orientation qui conduit à la hauteur la plus faible pour réduire le temps de fabrication, c'est à dire le balancement "d".

Nous aurions pu choisir de réaliser la pièce verticalement, au prix d'une modification de la géométrie lors de la phase de raffinement et de l'utilisation de supports.

4.4.5 Raffinement de la géométrie

Approche guidée Le choix d'une section constante facilite la phase de paramétrage. Nous avons déjà déterminé le nombre de voiles à l'aide d'une analyse par éléments finis, puisque l'outil d'optimisation ne permet pas l'utilisation de paramètres discrets. Une fois le nombre de voiles déterminé, le paramétrage est établi pour décrire les épaisseurs et les positions des différents voiles ainsi que la valeur des différents congés (Figure 4.10).

Afin de prendre en compte le dépoudrage à l'aide du PRS, la largeur entre deux voiles doit être supérieure à la longueur divisée par quatre, c'est à dire à environ 25 mm ce qui n'est pas possible, ici. Nous aurions pu faire le choix de positionner des ouvertures tous les 25 mm afin de pouvoir réaliser le dépoudrage. Ce choix remettant fortement en cause la conception, nous avons préféré faire le choix de recourir à un dépoudrage mécanique (réalisé à l'aide du PRS puis d'une corde à piano), étant donné que les volumes à dépoudrer sont traversants et de sections constantes. Le bornage des paramètres prend en compte l'épaisseur minimale réalisable (0,6 mm) ainsi qu'une dimension maximale afin de garantir la présence d'un espace entre deux voiles.

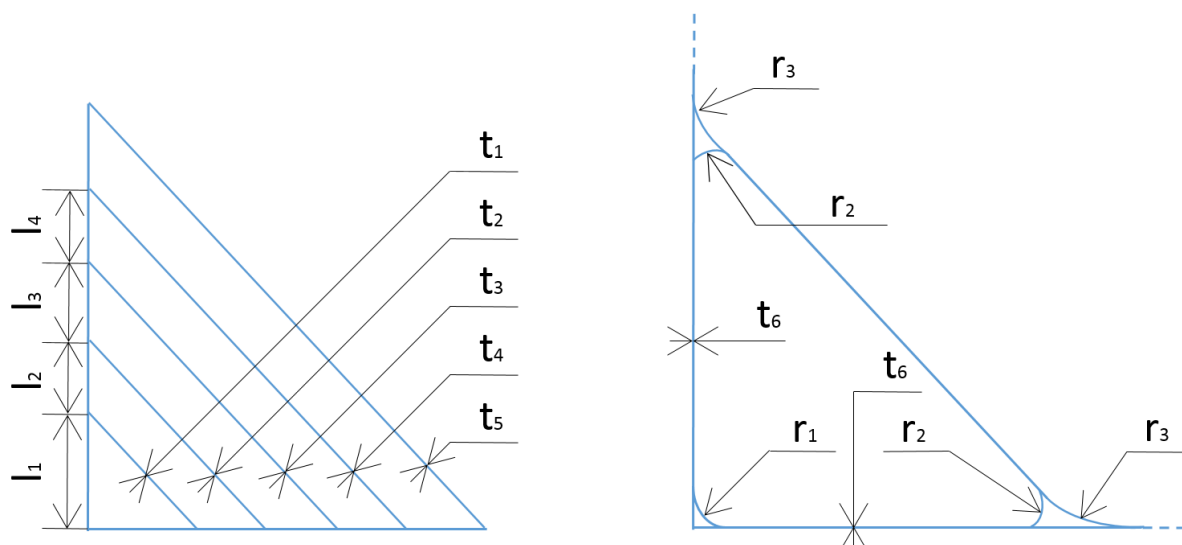


FIGURE 4.10 – Paramétrage de la section de la pièce

Optimisation topologique Utiliser les résultats de la phase d'optimisation topologique nécessite une phase de reconception complexe. En effet, les formes obtenues (figure 4.8) constituent un ensemble d'éléments maillés discontinus dont la forme est difficilement descriptible à l'aide d'outils CAO.

Nous avons établi plusieurs modèles successifs, qui ont été testés à l'aide d'analyses par éléments finis, afin d'obtenir une géométrie compatible avec le chargement de la pièce et similaire au résultat obtenu par optimisation topologique. La géométrie est composée

de 12 éléments, eux-mêmes constitués de deux poutres reliées entre elles. Le paramétrage de la pièce concerne les diamètres des différentes sections cylindriques, l'emplacement des points de contrôle qui définissent la position et la forme du profil des poutres, ainsi que la valeur des différents congés de raccordement. Les plages de variation des paramètres ont été choisies afin de prendre en compte les dimensions minimales réalisables.

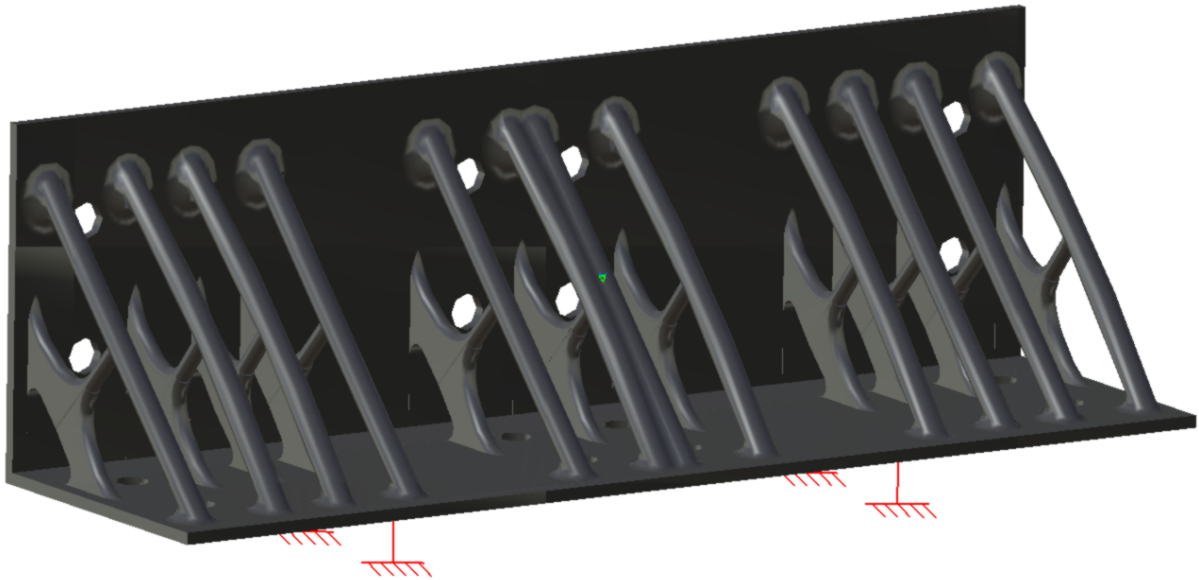


FIGURE 4.11 – Forme reconçue à partir des résultats obtenus par optimisation topologique

Optimisation sous contrainte Les deux modèles paramétrés obtenus, il est possible d'optimiser les jeux de paramètres par rapport au chargement. Nous avons défini le cas de chargement spécifié, les paramètres modifiables ainsi que leurs plages de variation, le critère d'optimisation et les contraintes d'optimisation. Le critère choisi est la minimisation du volume que nous considérons comme une représentation du coût de la pièce. Les contraintes d'optimisation sont la valeur maximale du critère de Von Mises qui est comparé à la limite élastique du Ti6Al4V moulé, divisé par le coefficient de sécurité ($\approx 420\text{MPa}$) et la valeur maximale de la déformation ($0,5\text{ mm}$).

L'optimisation a été réalisée avec un maillage fin (éléments de $0,2\text{ mm}$) et sur un grand nombre de boucles itératives (environ une centaine, plusieurs heures de calcul). Dans le cas de la géométrie issue du choix du concepteur, le jeu de paramètres optimisés conduit à une pièce dont la masse est de 47 g (Figure 4.12). Pour la pièce conçue à partir des résultats d'optimisation topologique, la pièce optimisée a une masse de 29 g (Figure 4.13).

4.4.6 Obtention de la géométrie finale et validation

Géométrie finale Les deux pièces ne nécessitent pas de support, elles doivent cependant être modifiées pour tenir compte des opérations de parachèvement. Nous avons donc ajouté une surépaisseur d'usinage de $0,2\text{ mm}$ aux surfaces fonctionnelles qui seront finies

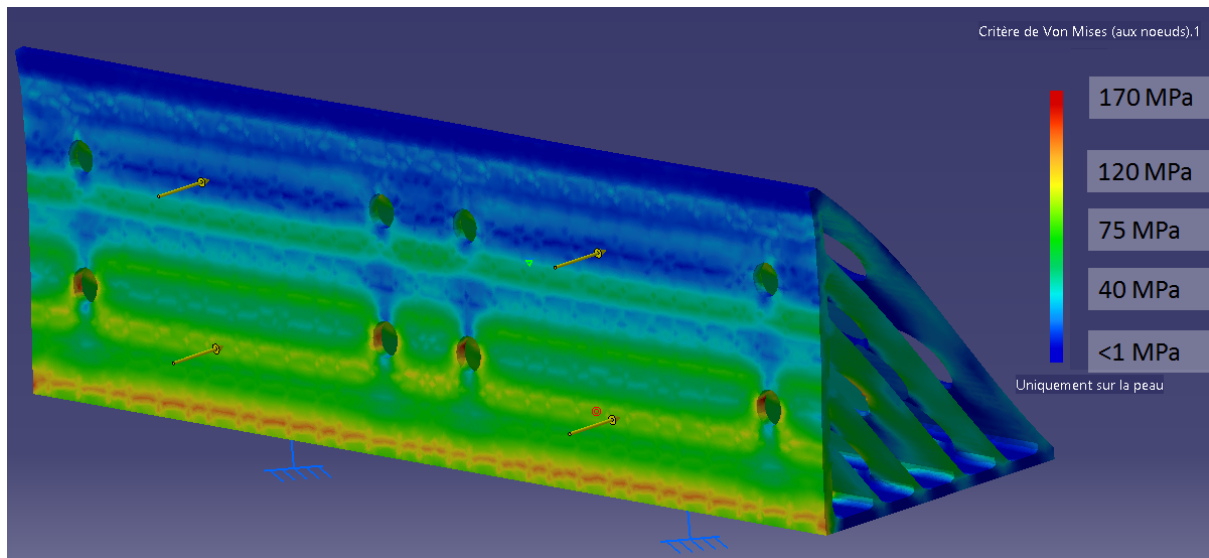


FIGURE 4.12 – Validation de la forme finale par calcul par éléments finis

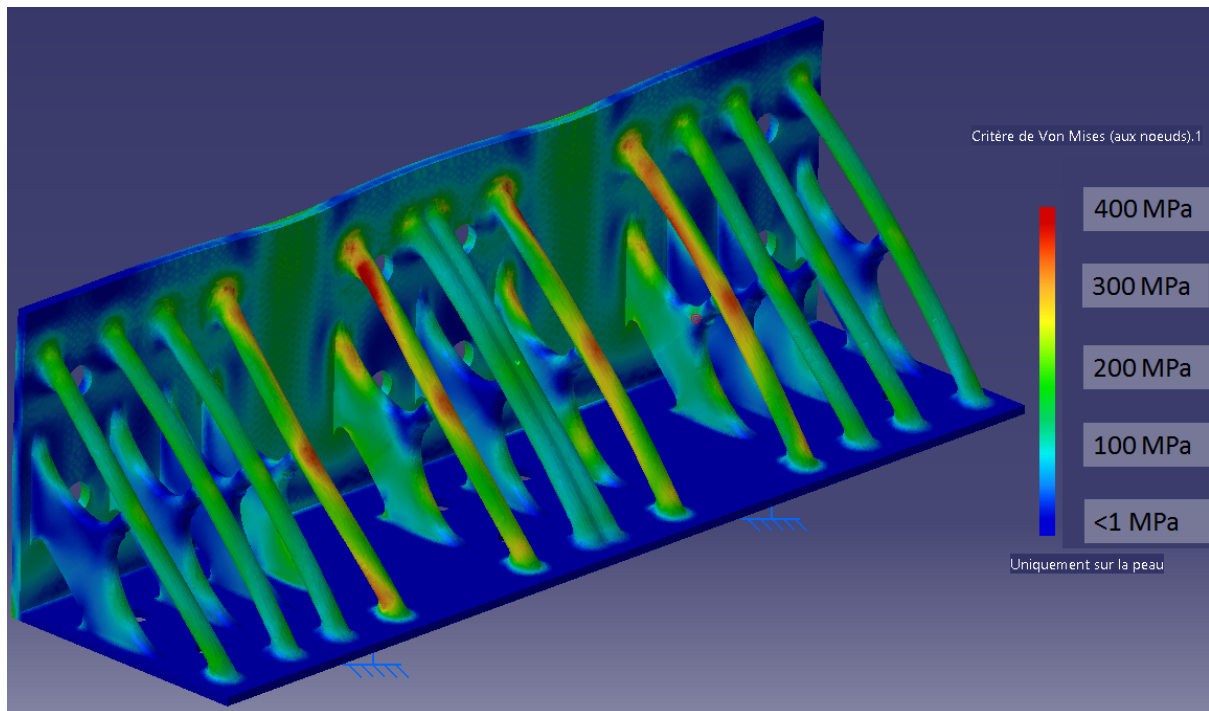


FIGURE 4.13 – Forme reconçue à partir des résultats obtenus par optimisation topologique (en haut) et résultat de l'optimisation paramétrique (en bas)

par usinage. Nous avons fait le constat, au chapitre 3, que la section des éléments géométriques fins présente des variations dimensionnelles importantes. Afin de prendre ce phénomène en compte, nous avons ajouté une surépaisseur de 0,2 mm aux poutres et voiles minces les plus sollicités mécaniquement, pour garantir que l'épaisseur locale des

sections soit toujours, au moins, celle calculée lors du dimensionnement.

Validation Les deux pièces ont été réalisées par le moyen de fabrication EBM, sur notre machine "A1" (Figure 4.14). La première pièce (de section quasi-constante) nécessite une opération supplémentaire de dépoudrage, à cause de l'élancement de certains volumes creux. Celle-ci est réalisée manuellement par l'opérateur et demande environ six minutes par pièces, en plus de l'opération de dépoudrage réalisée à l'aide du PRS.

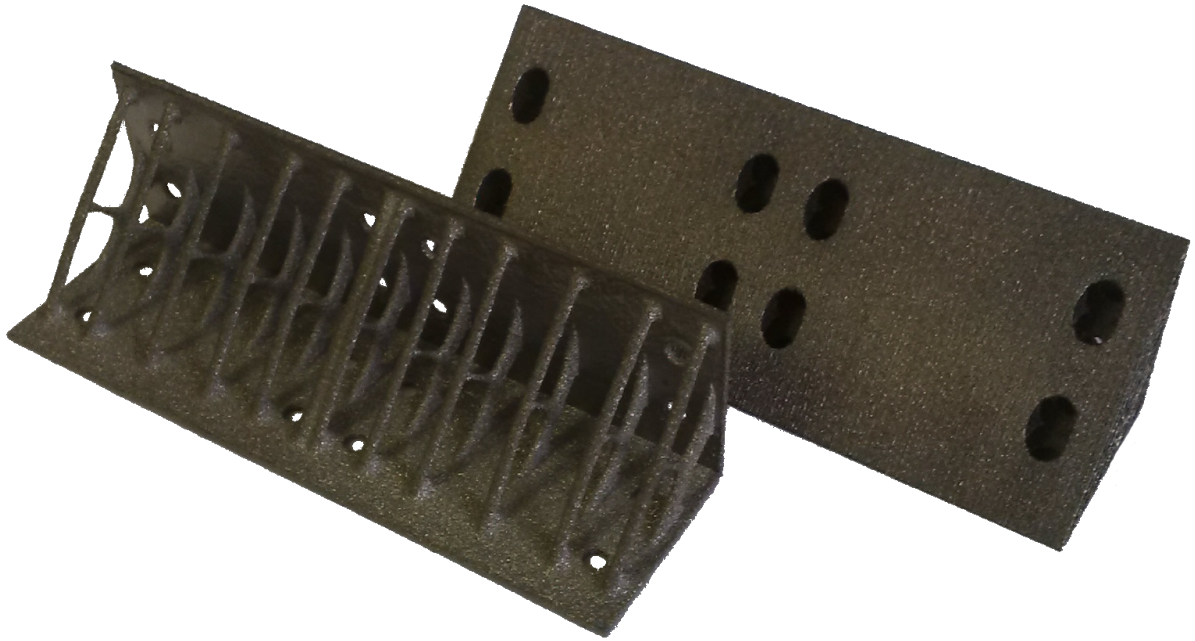


FIGURE 4.14 – Pièces reconçues, fabriquées par EBM.

Les pièces sont toutes deux plus légères que l'équerre initiale, malgré l'utilisation d'un matériau plus dense. Elles respectent à la fois les exigences du cahier des charges fonctionnel et les exigences du procédé (mise à part la dépoudrabilité pour une des pièces). Afin de répondre aux spécifications géométriques, une opération de finition par usinage, prise en compte lors de la conception, est nécessaire. Le tableau suivant permet de synthétiser les informations relatives au volume, à la masse et à la durée de fabrication de la pièce initiale, de la pièce reconçue en suivant la démarche guidée et de celle reconçue en exploitant des résultats d'optimisation topologique :

Pièce	Volume	Masse	Durée	Coût
Usinée	18,6 cm ³	52 g	5 min ^a	25,15 € ^b
EBM guidée	11,8 cm ³	49 g	1h08 ^c	55,50 € ^d
EBM optimisation topologique	7,6 cm ³	29 g	57 min ^e	45,40 € ^f

-
- a.* 2 min pour l'ébauche, et 3 min pour la finition
b. 12,50 € d'usinage et 12,65 € de matière première (à 50 €/kg)
c. Pour 60 pièces : 56h30 de réalisation des couches et 6h de préparation, établissement du vide, préchauffe et refroidissement. 6 minutes de dépoudrage manuel
d. Sans les coûts de préparation numériques, ni de finition. 9,80 € de matière première, 41,67 € d'utilisation machine et de main d'œuvre et 4 € de dépoudrage manuel
e. Pour 12 pièces : 6h50 de réalisation des couches et 4h30 de préparation, établissement du vide, préchauffe et refroidissement
f. Sans les coûts de préparation, ni de finition. 5,80 € de matière première et 39,60 € d'utilisation machine et de main d'œuvre

Les deux pièces reconçues ont un coût de revient (sans inclure les coûts de préparation et ceux de finition) deux fois plus important que celui de la pièce usinée, avec nos hypothèses sur le coût des machines. Cette différence est essentiellement due à la forme de la pièce initiale ainsi qu'au choix du matériau, qui permettent d'exploiter la grande productivité du centre d'usinage (bonnes conditions de coupes qui permettent un bon débit de copeaux).

Les deux pièces reconçues ont des formes très différentes. La pièce dont la topologie a été déterminée par le concepteur peut être fabriquée facilement en grande série, puisqu'il est possible d'en réaliser 60 simultanément. Le temps de fabrication est cependant important, car les sections sont peu massives et les durées de balayage des contours importantes (un travail d'optimisation des paramètres de fabrication serait pertinent si cette pièce devait être produite industriellement). Par ailleurs, l'opération de dépoudrage manuelle a une durée de 5h pour les 60 pièces, il serait donc pertinent de modifier la pièce pour l'éviter. L'utilisation d'outils d'optimisation topologique a permis d'obtenir une pièce 44% moins lourde. Dans un contexte aéronautique où l'on cherche à réduire la masse embarquée, une telle pièce est très intéressante malgré le surcoût qu'elle occasionne.

4.5 Critiques

La démarche proposée permet de concevoir une pièce fabriquable à partir des spécifications du cahier des charges fonctionnel. Nous avons identifié deux limites à cette démarche : la prise en compte des structures légères tels les treillis et celle du facteur thermique.

Les outils d'optimisation proposés, qu'il s'agisse des outils d'optimisation topologique ou du module d'optimisation sous contrainte de CATIA, ne sont pas adaptés pour manipuler les treillis. En effet, ces logiciels effectuent des calculs par éléments finis à partir d'éléments volumiques. Les faibles dimensions des poutres des treillis nécessitent un nombre d'éléments considérable qui rend l'utilisation de calcul par éléments finis très coûteuse en temps, voire impossible en raison du trop grand nombre d'éléments volumiques. Cet aspect fait l'objet de travaux sur lesquels nous reviendrons dans les perspectives.

De plus, en l'absence de simulation thermique du procédé, la prise en compte du facteur thermique repose sur la réalisation de prototypes lors de la réalisation de pièces complexes. Afin de ne plus dépendre de ces prototypes, il est nécessaire de simuler le processus de fabrication pour déterminer les volumes qui présentent une surchauffe, dans le but de modifier les paramètres de la fusion et de placer les supports adaptés.

4.6 Conclusion

Nous avons présenté une démarche de conception qui permet d'obtenir des pièces fabriquables par le procédé EBM en exploitant les possibilités de conception présentées au chapitre 3. Cette démarche, qui peut être itérative, nécessite une description des besoins dans un cahier des charges fonctionnel. A partir de ces informations, une ou plusieurs formes théoriques sont générées soit par le concepteur, soit par des outils d'optimisation topologique. Le concepteur choisit ensuite un ou plusieurs balançages, en se basant sur les dimensions de la pièce, la fabricabilité, la durée de fabrication, la qualité des surfaces et le coût des pièces fabriquées. Une fois le balancement choisi, les géométries initiales sont modélisées dans un logiciel de CAO. Leur géométrie est décrite par un jeu de paramètres établi par le concepteur, pour permettre le dimensionnement par optimisation paramétrique et prendre en compte les contraintes de fabrication. L'optimisation paramétrique est ensuite menée par rapport à un critère défini par le concepteur, tout en respectant les contraintes dimensionnantes (liées à des sollicitations mécaniques par exemple). Enfin, la forme optimisée est validée, c'est à dire que les surépaisseurs d'usinage éventuelles sont ajoutées et que les supports sont générés, s'ils sont nécessaires. La pièce est alors prête pour la fabrication.

Cette démarche a été appliquée à deux cas d'étude, une pièce aéronautique et un décapsuleur (Annexe C), afin de l'illustrer et de montrer ses limites. Les pièces obtenues ont été réalisées et ont validé les principes exposés dans la démarche. La considération de l'évolution du domaine des possibles en conception de produit n'est toutefois que partielle, car notre démarche ne permet pas de considérer aisément les structures de type treillis, notamment parce que les moyens d'optimisation topologique ne permettent pas de les obtenir. La validation des formes est également incomplète car elle nécessite souvent la réalisation de prototypes, en l'absence de simulation du procédé. La prise en compte de la problématique thermique est aujourd'hui encore partielle. Ces remarques ouvrent des perspectives intéressantes que nous allons aborder dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Perspectives

5.1 Introduction

A l’occasion de ce travail de thèse, nous avons étudié l’évolution du domaine de conception de produits causée par l’utilisation des procédés additifs métalliques en couches. Nous nous sommes ensuite intéressés aux différents facteurs du procédé EBM qui impactent la conception. Nous avons enfin proposé une démarche de conception qui intègre ces facteurs, afin de permettre au concepteur d’exploiter les possibilités de l’EBM, tout en tenant compte des exigences de ce procédé et de celles exprimées dans le cahier des charges fonctionnel.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les perspectives et prolongements possibles de notre travail. Dans un premier temps, nous nous intéresserons à la prise en compte de la gamme de fabrication dans la démarche de conception et en particulier des opérations de finition autres que l’usinage. Nous verrons ensuite les axes de travail intéressants pour approfondir la démarche de conception proposée. Puis, nous discuterons de la généralisation de cette démarche, c’est à dire de l’intérêt de ce travail pour des procédés de fabrication additive métalliques différents de l’EBM. Enfin, nous nous intéresserons à l’impact de ces procédés sur la conception de mécanismes, et non plus de pièces seules.

5.2 Opérations de finition et gamme de fabrication

La démarche proposée permet de tenir compte des surépaisseurs d’usinage et de l’accessibilité des outils de coupe pour les phases de finition par usinage. Cette proposition ne s’intéresse pas à l’ensemble de la gamme de fabrication d’une pièce et notamment aux autres types de finitions qui peuvent être réalisés.

5.2.1 Finition par usinage

Lors de ce travail, nous avons considéré que la finition éventuelle des pièces est réalisée par usinage. Pour effectuer cette opération, la pièce doit pouvoir être montée dans la machine d’usinage, ce qui peut être délicat pour des éléments fins ou présentant des structures en treillis. En effet, ce type de pièce peut nécessiter un posage très spécifique et des conditions de coupe dégradées pour éviter les déformations.

Il est possible de prendre en compte ce besoin dès les phases amont du processus de conception, pour que la pièce demi-finie, réalisée à l’aide du procédé EBM, inclue des volumes destinés à faciliter les opérations de finition par usinage. Les surfaces et les volumes définis dans ce but peuvent d’ailleurs être enlevés lors de la finition lorsqu’ils ne sont plus utiles.

5.2.2 Traitements thermiques

La présence éventuelle de porosités et de contraintes résiduelles au sein des pièces peut être atténuée par un traitement thermique. La compression isostatique à chaud (*Heat Isostatic Pressure* - HIP), en particulier, permet d’éliminer les micro-porosités [Gil10]. Ce traitement conduit néanmoins à des changements de la microstructure et à une modification des propriétés du matériau [HMFJ12] qui influencent le dimensionnement de la pièce. Des travaux sont nécessaires pour caractériser l’amélioration de l’intégrité de la

matière ainsi que la modification du comportement des pièces pour trouver des compromis utilisables lors de la conception. La prise en compte de ces traitements devra en outre être prise en compte à un stade amont du processus de conception.

5.2.3 Autres procédés de finition

L'utilisation de moyens d'usinage, pour effectuer la finition, contraint la géométrie des surfaces finies. Nous avons établi, par ailleurs, que ce type de procédé n'est pas adapté à la finition de formes fines et complexes. Afin d'améliorer les états de surfaces, d'autres moyens de finition semblent pertinents : le micro-billage, le sablage, l'utilisation de bains électrolytiques, etc. Ces procédés ont des exigences et des contraintes d'utilisation différentes, notamment en ce qui concerne l'accès aux surfaces.

L'utilisation de moyens permettant de finir des surfaces complexes ou fines, tout en possédant moins de contraintes d'accessibilité, offrirait au concepteur plus de libertés. La finition de treillis, par exemple, est inconcevable en usinage alors qu'un bain électrolytique permet d'accéder à toutes leurs surfaces. Leurs contraintes diffèrent de celles de l'usinage (circulation d'un fluide pour l'attaque chimique, orientation du flux des billes en micro-billage, etc) et nécessitent des travaux pour être intégrées dans la démarche de conception. Leurs performances, vis-à-vis des surfaces qui présentent de fortes rugosité et des particules de poudre résiduelles, doivent également faire l'objet de travaux pour définir le domaine d'utilisation de ces procédés.

5.3 Approfondissement de la démarche de conception pour l'EBM

Le travail que nous avons effectué nous a permis d'explicitier certains phénomènes qui influent sur la fabrication. Nous avons ensuite inclus ces informations dans une démarche de conception sous forme de préconisations. Celles-ci concernent notamment la fabricabilité des pièces de même que le besoin d'une meilleure compréhension et prise en compte du phénomène thermique. Afin d'exploiter le plein potentiel du procédé EBM, l'influence des paramètres de fabrication sur la fabricabilité et qualité doit être considérée, tout comme la génération des supports. Nous aborderons également la problématique des treillis et les améliorations nécessaires dans la chaîne numérique CAO-FAO-CN.

5.3.1 Fabricabilité et simulation numérique

Nous avons mis en évidence les phénomènes de déformation thermique et de présence de porosités qui peuvent survenir lors de la fabrication. Pour éviter qu'ils ne se produisent, nous avons émis des recommandations concernant l'orientation des surfaces et des volumes dans l'enceinte de fabrication, ainsi que sur le besoin de supports. Cette approche expérimentale permet d'identifier a priori les entités géométriques les plus difficiles à réaliser, mais elle n'est pas suffisante pour valider une géométrie.

Afin de pouvoir valider la géométrie de la pièce, il est nécessaire de simuler sa fabrication. Les interactions thermiques entre les différentes pièces peuvent difficilement être prises en compte à partir de règles empiriques, à cause de l'importance de la géométrie des

pièces et du grand nombre de cas possibles. Un outil de simulation du procédé permettrait de valider la géométrie et de définir plus précisément le domaine de conception.

5.3.2 Supports

La prise en compte des supports est aujourd'hui limitée. Nous avons émis des recommandations basées sur des observations expérimentales, cependant nous n'avons pu émettre de règle de génération des supports. La génération des supports nécessaires, qu'ils soient intégrés à la pièce ou séparés à l'issue de la fabrication, va de pair avec le besoin de simulation thermique. En effet, si nous savons aujourd'hui qu'ils doivent être placés au niveau des contours et sous les surfaces négatives, nous ne savons pas déterminer la densité minimale de supports nécessaire pour éviter les déformations thermiques.

5.3.3 Impact des paramètres de fabrication sur la conception

Des fonctions de compensation sont utilisées par le logiciel qui pilote le faisceau d'électrons, pour diminuer la quantité d'énergie apportée dans les zones sujettes aux accumulations de chaleur. Nous avons réalisé des tests qui établissent l'intérêt de la modification de ces fonctions, afin de fabriquer des pièces présentant moins de déformations thermiques, nécessitant donc moins de supports.

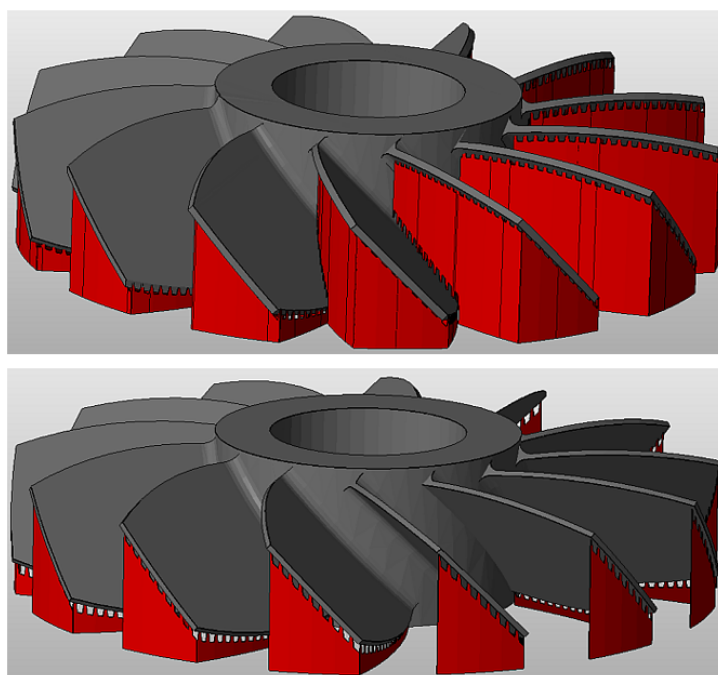


FIGURE 5.1 – Turbine et ses supports réalisée avec les paramètres standard (en haut) et avec des paramètres optimisés (en bas)

La turbine présentée en introduction demande, par exemple, moins de supports (Figure 5.1) si la quantité d'énergie apportée pour fondre les aubes est diminuée. Outre une réduction de la matière première d'un facteur 9,5 (volume de supports de $1,98 \text{ cm}^3$

contre $18,95 \text{ cm}^3$), l'utilisation de paramètres de fabrication adaptés à la géométrie permet d'agrandir le domaine de conception et offre plus de libertés au concepteur. Notamment, dans ce cas, car la présence de supports dégrade localement les états de surfaces et impose des opérations de finition supplémentaires qui nécessitent la prise en compte des exigences de ces procédés. Cette modification, menée empiriquement, peut néanmoins conduire à la présence de porosités comme nous l'avons montré au chapitre 3. Une bonne compréhension de l'impact de ces paramètres sur le phénomène de fusion et donc nécessaire.

Cet axe de recherche sur la modification des paramètres de fabrication bénéficierait grandement de l'utilisation d'outils de simulation. À terme, ces travaux permettraient d'apporter de nouvelles libertés au processus de conception. Des travaux sur ce sujet sont actuellement en cours au laboratoire.

5.3.4 Prise en compte des treillis dans la conception

Chaîne numérique La chaîne numérique actuelle n'est pas adaptée à l'utilisation des treillis ; les fichiers CAO décrivent un ensemble de surfaces discrétisées. La faible épaisseur des treillis donne ainsi lieu à des fichiers très fortement discrétisés et très lourds. La multiplication d'éléments augmente également les risques de défauts dans le fichier (triangles sécants, par exemple). La problématique de la chaîne numérique en fabrication additive a suscité des travaux, notamment dans le cadre de l'utilisation du procédé de fabrication direct [BMH10]. Actuellement les formats de fichiers employés ne sont toujours pas adaptés à la prise en compte des treillis, la discrétisation causant une perte importante d'information et une taille élevée des fichiers. Des travaux de thèse sont actuellement en cours au laboratoire afin de faciliter l'utilisation de ce type de structure.

Treillis et démarche de conception Dans la démarche proposée, les treillis peuvent être introduits lors de la génération de forme initiale ou pendant la phase de raffinement de la géométrie. Les moyens d'optimisation topologique permettent difficilement d'obtenir de telles structures, à cause de la très importante discrétisation nécessaire (en particulier si leur épaisseur est d'environ $0,6 \text{ mm}$). Afin de mieux prendre en compte ce type de géométrie lors du dimensionnement des pièces, il serait intéressant de considérer les treillis comme un matériau dense ayant des propriétés particulières. Cette approche permettrait d'utiliser plus facilement ces structures et permettrait de faire intervenir la notion de matériau architecturé dans la phase de conception. Cet axe de recherche repose en grande partie sur la caractérisation du comportement de ces structures afin de pouvoir les modéliser par plusieurs matériaux équivalents.

5.4 Généralisation de la démarche de conception

La démarche proposée permet d'articuler et de prendre en compte les exigences du procédé, analysées lors du chapitre 3, ainsi que les possibilités montrées au chapitre 2. Les préconisations sont données pour le procédé EBM dans le cadre de la conception ou de la reconception d'une pièce. La généralisation de cette démarche fait partie des perspectives de notre travail. Elle peut s'appliquer à d'autres procédés de fabrication, ainsi qu'à la conception de mécanismes.

5.4.1 Application aux autres technologies additives métalliques

Projection de poudre fondue Le procédé de projection de poudre diffère grandement du procédé EBM, notamment par l'importance et la complexité de la génération des trajectoires. Des travaux menés récemment à l'IRRCyN [Pon13] montrent l'importance de cette phase. Les règles de conception sont alors différentes. Le principe de la démarche est toutefois exploitable, au prix de modifications pour intégrer les exigences spécifiques de ce procédé.

Fusion Laser Le procédé LBM est comparable au procédé EBM. La différence majeure concerne les conditions de fabrication des pièces. Celles-ci sont réalisées à l'aide d'un faisceau Laser, sous atmosphère inerte et à pression atmosphérique, au sein d'un lit de poudre à température plus basse qu'en EBM (de 200 à 450 °C contre 750 °C). La problématique thermique diffère donc de ce que nous avons présenté car le gradient thermique, plus important, a un effet notable sur la déformation des pièces et sur la présence de contraintes résiduelles. Par ailleurs, l'absence de phase de consolidation de la poudre facilite l'opération de dépoudrage : casser les liaisons entre particules de poudre n'est plus nécessaire, une simple aspiration suffit.

Nous avons établi que les contraintes de fabrication étaient différentes, la présence de supports étant plus critique alors que l'opération de dépoudrage est moins contraignante. Ces différences peuvent être intégrées à la démarche proposée en modifiant les bornes de variation de certains paramètres, et en pondérant différemment la prise en compte du facteur thermique, lors du choix du balayage et du raffinement de la géométrie, par exemple.

5.4.2 Application à la conception de mécanismes et de pièces déformables

La démarche proposée concerne les pièces ou les ensembles de pièces rigides. Des applications aux mécanismes et aux pièces déformables nous paraissent intéressantes.

Fabrication de mécanismes Nous avons vu au chapitre 2 que l'accessibilité de l'ensemble du volume de fabrication permet de produire des pièces imbriquées possédant des mobilités les unes par rapport aux autres. Il est donc possible de réaliser des mécanismes sans assemblage (Figure 5.2).

Des tests préliminaires de réalisation de liaisons pivot d'axe vertical ont permis de déterminer qu'il est nécessaire d'avoir un jeu fonctionnel d'au moins 0,4 mm entre les deux surfaces, afin de garantir la mobilité de la liaison. La poudre consolidée ne peut alors pas être intégralement enlevée à l'aide du PRS et le dépoudrage se fait par friction, en faisant travailler la liaison. A cause du jeu important et de la présence résiduelle de poudre, les liaisons réalisées possèdent des mobilités parasites. Les applications possibles concernent des déplacements à faible vitesse qui tolèrent des jeux importants. Cet axe de recherche peut être mis en relation avec les formes présentées dans la figure 4.2 du chapitre 4. Des travaux sont nécessaires afin de s'intéresser aux formes géométriques qui permettent de réaliser un meilleur guidage, tout en facilitant le dépoudrage.

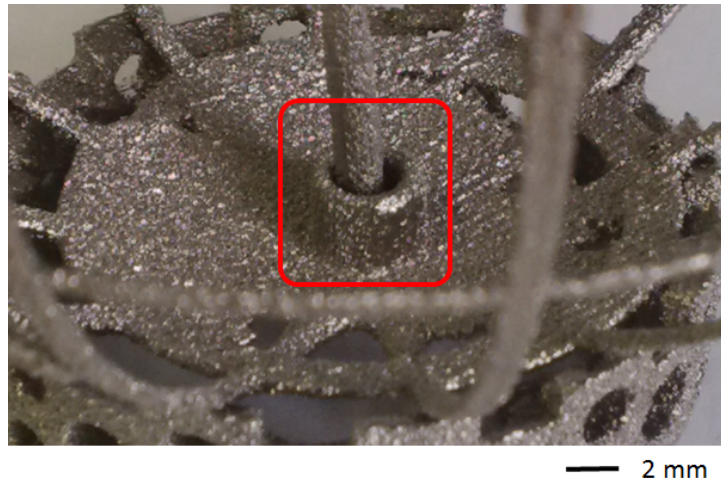


FIGURE 5.2 – Liaison pivot d'un mécanisme réalisé par EBM

Réalisation de pièces déformables Nous avons également mené une réflexion sur l'intérêt de fabriquer des pièces déformables et entrepris de reconcevoir un vérin hydraulique qui limite le nombre de pièces, en réalisant une pièce qui intègre un soufflet. Les pièces que nous avons conçues et fabriquées ne répondaient pas au cahier des charges que nous nous étions fixé, notamment parce que l'amplitude des déplacements était très faible (quelques millimètres pour une pression de plusieurs dizaines de bars).

Nos recherches préliminaires nous ont conduit à questionner le principe de solution d'un produit : la possibilité de fabriquer des pièces déformables ou des mécanismes remet en cause le processus de conception en amont de l'élaboration du cahier des charges fonctionnel. Cette liberté permet d'envisager des solutions techniques nouvelles aux fonctions techniques d'un produit.

5.5 Impacts environnementaux

L'impact environnemental de la production de pièces à l'aide de procédés additifs n'a pas été complètement quantifié comme nous l'avons vu au chapitre 1. Ces procédés permettent d'avoir des gains en terme de masse et d'énergie consommée comme nous l'avons vu sur l'exemple de l'équerre (en introduction). Nous pouvons aujourd'hui, comparer l'élaboration de pièces par fabrication additive et par procédés conventionnels car nous disposons d'une démarche qui permet de concevoir des pièces adaptées. Il est donc possible de réaliser une comparaison à unité fonctionnelle équivalente. L'influence de la réduction de masse de pièces produites par fabrication additive, comme l'équerre aéronautique du chapitre 4, sur l'impact environnemental de la pièce sur l'ensemble de son cycle de vie est également un axe de recherche intéressant.

5.6 Conclusion

Lors de travail, nous avons étudié l'impact des procédés additifs sur la conception de produits. Nous avons proposé une démarche qui permet de tenir compte des phénomènes observés lors de la caractérisation expérimentale du procédé EBM. De nombreuses pistes ouvertes restent à préciser.

La prise en compte des opérations de finition pour les pièces fabriquées par les procédés additifs est limitée, dans la démarche proposée, aux procédés d'usinage. D'autres moyens de finition semblent pertinents pour parachever les pièces : traitements thermiques, attaques chimiques, micro-billage, sablage, etc. Un travail est nécessaire pour déterminer les possibilités qu'ils offrent ainsi que leurs exigences, afin de pouvoir les prendre en compte dans la démarche de conception.

La démarche proposée considère de nombreuses données empiriques. Pour prendre en compte les facteurs présentés lors du chapitre 3, de manière plus complète, des limites scientifiques doivent être franchies. La première d'entre elles concerne la simulation du procédé afin de maîtriser la problématique thermique. Nous savons que certaines interactions ne sont ainsi pas considérées, notamment pour les pièces qui possèdent des géométries complexes. Il est également nécessaire d'approfondir la prise en compte des supports, notamment en relation avec celle des paramètres de fabrication. Ceux-ci ne sont pas optimisés, ce qui limite les possibilités offertes par les procédés. Des essais ont montré les gains possibles en termes de réduction des déformations, et donc de la quantité de supports. Ce travail sur l'optimisation des paramètres de fabrication devrait offrir au concepteur de nouvelles opportunités. Enfin, la capacité à fabriquer des treillis est difficilement exploitable en raison d'une chaîne numérique peu adaptée (lors de la conception) et des méthodes de calcul par éléments finis (dans les phases de dimensionnement).

La démarche proposée permet de traiter des pièces fabriquées à l'aide du procédé EBM. Elle peut être utilisée pour d'autres procédés additifs en couches, à condition de caractériser les exigences de ces procédés. La possibilité de réaliser des mécanismes ne nécessitant pas d'assemblage, que nous avons abordée à l'occasion de ce travail de thèse par des recherches préliminaires, n'est pas prise en compte dans la démarche proposée. Cette aspect est très prometteur pour les concepteurs, et nécessitent des recherches avancées. L'exploitation de cette liberté se fera vraisemblablement en amont de la démarche proposée car elle remet en cause le principe même de solutions techniques.

Enfin, l'approche environnementale des procédés de fabrication additive constitue un axe de recherche intéressant qui bénéficie des travaux réalisés lors de travail de thèse.

Conclusion

Ce travail de thèse est le premier effectué au laboratoire G-SCOP sur la thématique de la fabrication additive. Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude de l'état de l'art en fabrication additive. Nous nous sommes intéressés aux différents procédés et aux différentes technologies de fabrication additive, avant de nous focaliser sur les procédés métalliques qui nous paraissent apporter les changements les plus importants par rapport aux procédés conventionnels. L'étude bibliographique a montré la forte dynamique actuelle, en recherche et dans l'industrie, relative à ces procédés. De nombreux axes de recherche différents sont actuellement explorés, dans les domaines des matériaux, de l'amélioration des performances des procédés, et de l'exploitation des possibilités de la fabrication additive par les concepteurs. Les procédés de fabrication additive sont de plus en plus matures et employés dans l'industrie. Leur utilisation est à ce jour essentiellement consacrée à la fabrication de pièces semblables à celles réalisées avec des procédés conventionnels. Les outils et les méthodes existants traitent de problèmes particuliers (impact du balayage sur l'effet d'escalier, utilisation de moyens d'optimisation topologique, calcul de la complexité de fabrication, etc). A ce jour, les contraintes de fabrication des procédés en couches ne sont pas pris en compte dans une démarche de conception globale.

Ces nouveaux procédés modifient le domaine des possibles en conception de produits. La fabrication de pièces fines et élancées, de pièces complexes, de pièces aux surfaces peu accessibles ou la réalisation de treillis tridimensionnels et de matériaux architecturés est désormais possible, et ouvre de nouvelles opportunités pour la conception de produits. Les exigences des procédés additifs par couches sont spécifiques, avec des contraintes relatives à la problématique thermique, à la récupération de la poudre non fondue, à la qualité des pièces et aux matériaux. Ces nombreux changements par rapport aux procédés conventionnels nécessitent la conception spécifique de pièces, pour exploiter les nouvelles possibilités de ces procédés additifs et prendre en compte leurs contraintes de fabrication.

Grâce à l'acquisition d'un moyen de fabrication EBM par le laboratoire G-SCOP, suite au travail sur l'état de l'art sur les différentes technologies additives, nous avons pu mener des expérimentations pour caractériser les phénomènes qui interviennent lors de la fabrication. Ces phénomènes ont une incidence sur la fabrication des pièces et, par conséquent, sur le processus de conception qui vise à obtenir des produits fabricables. Nous avons montré :

- l'influence du temps de dépoudrage et de la géométrie de la pièce sur la quantité de poudre économiquement enlevable (à l'aide du PRS qui permet la réutilisation de la poudre non consolidée),
- la présence de déformations thermiques et de porosités, liées à l'orientation et à la géométrie des pièces,
- l'impact de la présence de supports sur la déformation d'une pièce test,
- l'incertitude dimensionnelle et la qualité surfacique des pièces fabriquées par EBM,
- les propriétés mécaniques de pièces obtenues par EBM.

Par la suite, nous avons étudié la durée de réalisation d'un lot de pièces par EBM. Elle comprend une partie fixe nécessaire à la mise en place du vide, la préchauffe de la plaque et le refroidissement des pièces ainsi qu'une durée variable de réalisation des pièces. Dans un contexte industriel, ce procédé est très rarement utilisé pour fabriquer une seule pièce. Nous nous sommes donc intéressés à l'impact de la géométrie d'une pièce sur la durée de fabrication et le coût de revient, notamment lors de la fabrication de lots hétérogènes. Nous avons montré le lien entre la géométrie et la contribution d'une pièce à la durée de

fabrication d'un lot. Cette relation a été ensuite exploitée pour proposer un modèle de coût de revient technique des pièces réalisées par ce procédé et montrer l'influence de la conception sur le coût.

Pour exploiter les connaissances acquises par l'utilisation et les expérimentations, nous avons proposé une démarche qui les articule dans une méthode de conception. Cette démarche permet de concevoir une pièce fabricable à partir d'un cahier des charges fonctionnel. Elle met en jeu cinq étapes :

- l'analyse du cahier des charges permet d'obtenir les informations relatives aux surfaces fonctionnelles (forme, position, orientation), au volume de conception, au comportement spécifié et de déterminer le besoin éventuel d'opérations de finition,
- à partir de ces informations, un ou plusieurs formes sont générées par le concepteur, aidé éventuellement par des résultats d'optimisation topologique,
- le concepteur choisit ensuite le balançage de la pièce en considérant les dimensions de la machine, la fabricabilité (prise en compte du facteur thermique), le délai de fabrication (et le coût de revient) et la qualité des surfaces,
- l'étape suivante est le raffinement de la géométrie pour prendre en compte les sollicitations et les contraintes de fabrication. Le concepteur modélise dans un premier temps la géométrie initiale et définit un jeu de paramètres. Ces paramètres permettent de modifier la géométrie afin de l'optimiser par rapport au critère choisi (souvent la masse, qui peut être considérée comme une image du coût de revient), tout en respectant les exigences du procédé et le chargement spécifié,
- enfin, la géométrie finale est obtenue en prenant en compte les surépaisseurs nécessaires pour les procédés de finitions. Le concepteur peut également augmenter les épaisseurs des volumes fins et sollicités, afin de garantir que cette épaisseur est suffisante. Les supports éventuels sont ensuite positionnés et la pièce peut être fabriquée.

Ce travail ouvre de nombreuses perspectives que nous avons évoquées dans un chapitre spécifique (chapitre 5). Il nous paraît important de s'intéresser aux procédés de finition qui ne sont pas correctement pris en compte. Certains d'entre eux sont susceptibles d'ouvrir d'autres possibilités de conception. D'autre part, la démarche proposée repose sur une démarche empirique. Il nous paraît nécessaire d'avoir recours à un outil de simulation pour traiter la prise en compte des phénomènes thermiques qui interviennent durant la fabrication. L'approche que nous avons suivie ne permet pas d'estimer suffisamment finement la fabricabilité des pièces lorsque la géométrie est complexe ou en présence d'interactions entre les pièces fabriquées. Cet outil permettra, en outre, de déterminer la quantité de supports nécessaires, d'optimiser les conditions de fabrication et de limiter les phénomènes de déformations et de porosités que nous avons observés. La prise en compte des treillis, qui sont une possibilité de conception prometteuse, est aujourd'hui délicate à cause d'une chaîne numérique peu adaptée lors de la conception, et lors du dimensionnement des pièces. Des travaux sont donc nécessaires pour permettre au concepteur d'utiliser aisément ces structures lors de la conception. Nous avons également, lors de ce travail de thèse, réalisé des mécanismes ne nécessitant pas de montage, directement par EBM. Cette possibilité, que nous n'avons pas développée, laisse entrevoir des perspectives très intéressantes dans la conception de produits. Enfin, puisque nous disposons maintenant d'une démarche qui permet de concevoir des pièces adaptées au procédé EBM, nous pouvons nous intéresser au bilan environnemental de ce procédé et de l'ensemble du cycle

de vie des pièces qui sont réalisées. Les applications de ces procédés en éco-conception semblent évidentes en raison de la faible quantité de matière consommée et des gains de masse possibles.

Bibliographie

- [AB13] Arcam AB : Arcam launches arcam q20, décembre 2013. [http ://www.arcam.com/arcam-today-launches-arcam-q20-a-new-ebm-system-specifically-designed-for-cost-efficient-manufacturing-of-aerospace-related-components/](http://www.arcam.com/arcam-today-launches-arcam-q20-a-new-ebm-system-specifically-designed-for-cost-efficient-manufacturing-of-aerospace-related-components/).
- [AB14] Arcam AB : Machines EBM de la société arcam, 2014. [http ://www.arcam.com/technology/products/](http://www.arcam.com/technology/products/).
- [ABBZT10] S. S. AL-BERMANI, M. L. BLACKMORE, W. ZHANG et I. TODD : The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41(13):3422–3434, août 2010.
- [ACMV97] B. ANSELMETTI, A. CHEP, K. MAWUSSI et F. VILLENEUVE : Feature-state approach for operation sequence generation. In P. CHEDMAIL, J.-C. BOCQUET et D. DORNFELD, éditeurs : *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, pages 93–102. Springer Netherlands, janvier 1997.
- [AKL09] Daekeon AHN, Hochan KIM et Seokhee LEE : Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2):664–671, janvier 2009.
- [ANS14] ANSYS : Site officiel du logiciel ANSYS, avril 2014. [http ://www.ansys.com/](http://www.ansys.com/).
- [BDK10] Geoffrey BOOTHROYD, Peter DEWHURST et Winston A. KNIGHT : *Product Design for Manufacture and Assembly, Third Edition*. CRC Press, décembre 2010.
- [BL06] Hong-Seok BYUN et Kwan H. LEE : Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(1):69–80, février 2006.
- [BLO05] Young-bong BANG, Kyung-min LEE et Seungryul OH : 5-axis micro milling machine for machining micro parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(9-10):888–894, mai 2005.
- [BMH10] Renan BONNARD, Pascal MOGNOL et Jean-Yves HASCOËT : A new digital chain for additive manufacturing processes. *Virtual and Physical Prototyping*, 5(2):75, 2010.
- [BPA⁺11] S. BIAMINO, A. PENNA, U. ACKELID, S. SABBADINI, O. TASSA, P. FINO, M. PAVESE, P. GENNARO et C. BADINI : Electron beam melting of

- Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy : Microstructure and mechanical properties investigation. *Intermetallics*, 19(6):776–781, juin 2011.
- [BRCR13] N BOYARD, M RIVETTE, O CHRISTMANN et S RICHIR : A design methodology for parts using additive manufacturing. In Paulo da SILVA BARTOLO et Ana de LEMOS, éditeurs : *High Value Manufacturing : Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pages 399–404. CRC Press, septembre 2013.
- [BS03] Martin Philip BENDSOE et Ole SIGMUND : *Topology Optimization : Theory, Methods and Applications*. Springer, décembre 2003.
- [BSI⁺10] S. BASTURK, F. SENBABAOGU, C. ISLAM, M. ERTEN, I. LAZOGLU et T. GULMEZ : Titanium machining with new plasma boronized cutting tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1):101–104, 2010.
- [BVBD11] Tomaz BRAJLIH, Bogdan VALENTAN, Joze BALIC et Igor DRSTVENSEK : Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines. *Rapid Prototyping Journal*, 17(1):64–75, 2011.
- [Cas05] Laura CASTILLO : Study about the rapid manufacturing of complex parts of stainless steel and titanium. Rapport technique, AIMME (Instituto Tecnológico Metalmecánico), Valencia, Spain, 2005.
- [CCL11] N. CONTUZZI, S. L. CAMPANELLI et A. D. LUDOVICO : 3d finite element analysis in the selective laser melting process. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 10(3):113–121, septembre 2011.
- [CG95] K. D. CHRISTIAN et R. M. GERMAN : Relation between pore structure and fatigue behavior in sintered iron-copper-carbon. *International journal of powder metallurgy*, 31(1):51–61, 1995.
- [CSKG12] David E. COOPER, Mark STANFORD, Kevin A. KIBBLE et Gregory J. GIBBONS : Additive manufacturing for product improvement at red bull technology. *Materials & Design*, 41:226–230, octobre 2012.
- [CT01] K.-H CHANG et P.-S TANG : Integration of design and manufacturing for structural shape optimization. *Advances in Engineering Software*, 32(7):555–567, 2001.
- [DSRW10] Olaf DIEGEL, Sarat SINGAMNENI, Stephen REAY et Andrew WITHELL : Tools for sustainable product design : Additive manufacturing. *Journal of Sustainable Development*, 3(3):68–75, septembre 2010.
- [Eng14] Altair ENGINEERING : Site officiel des logiciels inspire et hyperworks, 2014. <http://www.altairhyperworks.com/>.
- [ESKW11] C. EMMELMANN, P. SANDER, J. KRANZ et E. WYCISK : Laser additive manufacturing and bionics : Redefining lightweight design. *Physics Procedia*, 12, Part A:364–368, 2011.
- [F0408] F04 COMMITTEE : Specification for wrought titanium-6Aluminum-4Vanadium alloy for surgical implant applications (UNS r56400). Rapport technique, ASTM International, 2008.
- [F0409] F04 COMMITTEE : Specification for titanium-6Aluminum-4Vanadium alloy castings for surgical implants (UNS r56406). Rapport technique, ASTM International, 2009.

- [FDC99] Thibault FARINEAU, Pascal DUVERLIE et Jean-Marie CASTELAIN : *Estimation des coûts en production mécanique*, volume Référence BM7076. Ed. Techniques Ingénieur, juillet 1999.
- [FdSB12] Flavio S. FOGLIATTO, Giovanni J.C. da SILVEIRA et Denis BORENSTEIN : The mass customization decade : An updated review of the literature. *International Journal of Production Economics*, 138(1):14–25, 2012.
- [FR08] Jackie FENN et Mark RASKINO : *Mastering the Hype Cycle : How to Choose the Right Innovation at the Right Time*. Harvard Business Press, 2008.
- [Fre14] Pauline FREOUR : Une prothèse de crâne imprimée en 3D posée avec succès, mars 2014. <http://sante.lefigaro.fr/actualite/2014/03/27/22157-prothese-crane-imprimee-3d-posee-avec-succes>.
- [Gar13] GARTNER : Gartner’s hype cycle special report for 2013, 2013. <https://www.gartner.com/doc/2574916/gartners-hype-cycle-special-report>.
- [GCB⁺11] Hae Jin GAM, Huantian CAO, Jaclyn BENNETT, Caroline HELMKAMP et Cheryl FARR : Application of design for disassembly in men’s jacket : A study on sustainable apparel design. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 23(2/3):83–94, juin 2011.
- [Gil10] Jeremy GILBERT : *Medical Device Materials V : Proceedings of the Materials & Processes for Medical Devices Conference 2009, August 10-12, 2009, Minneapolis, MN, USA*. ASM International, janvier 2010.
- [GK90] D. A. GERARD et D. A. KOSS : Low cycle fatigue crack initiation : modeling the effect of porosity. *International journal of powder metallurgy*, 26(4):337–343, 1990.
- [Gmb14] EOS GMBH : Fiche technique EOS m 400, avril 2014. http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eos_m_400.
- [GRS10] Ian GIBSON, David W. ROSEN et Brent STUCKER : Extrusion-based systems. In *Additive Manufacturing Technologies*, pages 160–186. Springer US, janvier 2010.
- [HCML⁺08] Ola L. A. HARRYSSON, Omer CANSIZOGLU, Denis J. MARCELLIN-LITTLE, Denis R. CORMIER et Harvey A. WEST II : Direct metal fabrication of titanium implants with tailored materials and mechanical properties using electron beam melting technology. *Materials Science and Engineering : C*, 28(3):366–373, avril 2008.
- [HHD05] Neil HOPKINSON, Richard HAGUE et Philip DICKENS : *Rapid Manufacturing : An Industrial Revolution for a Digital Age : An Industrial Revolution for the Digital Age*. Wiley-Blackwell, novembre 2005.
- [HMFJ12] Afshin Mohammad HOSSEINI, S.H. MASOOD, Darren FRASER et Mahnaz JAHEDI : Mechanical properties investigation of HIP and as-built EBM parts. *Advanced Materials Research*, 576:216–219, octobre 2012.

- [IIG95] R. IPPOLITO, L. IULIANO et A. GATTO : Benchmarking of rapid prototyping techniques in terms of dimensional accuracy and surface finish. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 44(1):157–160, 1995.
- [KBC07] Dong Soo KIM, Sung Woo BAE et Kyung Hyun CHOI : Development of industrial SFF system using dual laser and optimal process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6):659–666, 2007.
- [KBS⁺12] K. P. KARUNAKARAN, Alain BERNARD, S. SURYAKUMAR, Lucas DEMBINSKI et Georges TAILLANDIER : Rapid manufacturing of metallic objects. *Rapid Prototyping Journal*, 18(4):264–280, juin 2012.
- [KCDK09] Hyung-Chan KIM, Kyung-Hyun CHOI, Yang-Hoi DOH et Dong-Soo KIM : Fabrication of parts and their evaluation using a dual laser in the solid freeform fabrication system. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(10):4857–4866, 2009.
- [KDYD10] Karel KELLENS, Wim DEWULF, Evren YASA et Joost DUFLOU : Environmental analysis of SLM and SLS manufacturing processes. In *Proceeding of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, pages 423–428, Hefei, China, mai 2010.
- [KFR⁺03] J.P. KRUTH, L. FROYEN, M. ROMBOUTS, J. VAN VAERENBERGH et P. MERCELLS : New ferro powder for selective laser sintering of dense parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(1):139–142, 2003.
- [KHZ01] Tsai-C. KUO, Samuel H. HUANG et Hong-C. ZHANG : Design for manufacture and design for ‘X’ : concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41(3):241–260, décembre 2001.
- [KK06] Atsushi KOGUCHI et Noboru KIKUCHI : A surface reconstruction algorithm for topology optimization. *Engineering with Computers*, 22:1–10, juillet 2006.
- [KK07] S. KUMAR et J.-P. KRUTH : Effect of bronze infiltration into laser sintered metallic parts. *Materials & Design*, 28(2):400–407, 2007.
- [KLKC07] J.-P. KRUTH, G. LEVY, F. KLOCKE et T.H.C. CHILDS : Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2):730–759, 2007.
- [KMH10] O. KERBRAT, P. MOGNOL et J.-Y. HASCOET : Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3):208–215, 2010.
- [Kor10] Yoram KOREN : *The Global Manufacturing Revolution : Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*. John Wiley & Sons, novembre 2010.
- [KSCB10] K.P. KARUNAKARAN, S. SURYAKUMAR, U. CHANDRASEKHAR et A. BERNARD : Hybrid rapid manufacturing of metallic objects. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 1(4):433–455, janvier 2010.
- [KSJ⁺00] K. P. KARUNAKARAN, P. Vivekananda SHANMUGANATHAN, Sanjay Jannardhan JADHAV, Prashant BHADARIA et Ashish PANDEY : Rapid pro-

- totyping of metallic parts and moulds. *Journal of Materials Processing Technology*, 105(3):371–381, septembre 2000.
- [KVdSBM96] J.-P. KRUTH, B. Van der SCHUEREN, J.E. BONSE et B. MORREN : Basic powder metallurgical aspects in selective metal powder sintering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 45(1):183–186, 1996.
- [KVVvM05] J.P. KRUTH, B. VANDENBROUCKE, Ing. J. VAERENBERGH VAN et P. MERCELIS : Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. *In Proceedings of the PMI*, 2005.
- [Las11] Laurent LASZCZYK : *Homogénéisation et optimisation topologique de panneaux architecturés*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, novembre 2011.
- [LLH⁺09] Wei LU, Feng LIN, Jiandong HAN, Haibo QI et Naisheng YAN : Scan strategy in electron beam selective melting. *Tsinghua Science & Technology*, 14(Supplement 1):120–126, 2009.
- [LSK03] Gideon N. LEVY, Ralf SCHINDEL et J.P. KRUTH : Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2):589–609, 2003.
- [mé11] Directeur du Département de génie MÉCANIQUE : Page personnelle de m. william - département de génie mécanique et aérospatial du collège militaire royal du canada, juillet 2011. <http://www.rmc.ca/aca/me-gm/per/allan-wde-fra.php>.
- [MEQ⁺09] L.E. MURR, E.V. ESQUIVEL, S.A. QUINONES, S.M. GAYTAN, M.I. LOPEZ, E.Y. MARTINEZ, F. MEDINA, D.H. HERNANDEZ, E. MARTINEZ, J.L. MARTINEZ, S.W. STAFFORD, D.K. BROWN, T. HOPPE, W. MEYERS, U. LINDHE et R.B. WICKER : Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought ti-6Al-4V. *Materials Characterization*, 60(2):96–105, 2009.
- [MGC⁺10] L. E. MURR, S. M. GAYTAN, A. CEYLAN, E. MARTINEZ, J. L. MARTINEZ, D. H. HERNANDEZ, B. I. MACHADO, D. A. RAMIREZ, F. MEDINA, S. COLLINS et R. B. WICKER : Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Materialia*, 58(5):1887–1894, mars 2010.
- [MHB⁺09] Matti MOTTONEN, Janne HARKONEN, Pekka BELT, Harri HAAPASALO et Jouni SIMILA : Managerial view on design for manufacturing. *Industrial Management & Data Systems*, 109(6):859–872, juin 2009.
- [MHM13] Pierre MULLER, Jean Yves HASCOET et Pascal MOGNOL : A method for the manufacturing of functionally graded material parts. *Advanced Materials Research*, 698:117–126, mai 2013.
- [MK06] Peter MERCELIS et Jean-Pierre KRUTH : Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12(5):254–265, octobre 2006.

- [MLLL10] Javier MUNGUÍA, Joaquim LLOVERAS, Sonia LLORENS et Tahar LAOUI : Development of an AI-based rapid manufacturing advice system. *International Journal of Production Research*, 48(8):2261–2278, janvier 2010.
- [Nou14] L’Usine NOUVELLE : Premier vol pour un avion de combat tornado équipé de pièces imprimées en 3D, janvier 2014. <http://www.usinenouvelle.com/article/premier-vol-pour-un-avion-de-combat-tornado-equipe-de-pieces-imprimees-en-3d.N229745>.
- [PBFG07] Gerhard PAHL, W. BEITZ, Jörg FELDHOUSEN et Karl-Heinrich GROTE : *Engineering Design : A Systematic Approach*. Springer, août 2007.
- [Per01] Jacques PERRIN : *Concevoir l’innovation industrielle : méthodologie de conception de l’innovation*. CNRS Editions, 2001.
- [PG98] D.T PHAM et R.S GAULT : A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10–11):1257–1287, octobre 1998.
- [POL⁺10] Irene POSCH, Hideaki OGAWA, Christopher LINDINGER, Roland HARING et Horst HÖRTNER : Introducing the FabLab as interactive exhibition space. In *Proceedings of the 9th International Conference on Interaction Design and Children, IDC ’10*, page 254–257, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [Pon13] Rémi PONCHE : *Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, octobre 2013.
- [Pre14] Jean-Francois PREVERAUD : Fabrication additive de grandes dimensions, février 2014. <http://www.industrie-techno.com/fabrication-additive-de-grandes-dimensions.28229>.
- [PVRD07] P. M. PANDEY, N. VENKATA REDDY et S. G. DHANDE : Part deposition orientation studies in layered manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1–3):125–131, avril 2007.
- [RKG⁺13] H. K. RAFI, N. V. KARTHIK, Haijun GONG, Thomas L. STARR et Brent E. STUCKER : Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12):3872–3883, décembre 2013.
- [RT11] Gunther REINHART et Stefan TEUFELHART : Load-adapted design of generative manufactured lattice structures. *Physics Procedia*, 12, Part A:385–392, 2011.
- [Sak13] Adnene SAKLY : *Fabrication additive de pièces à base d’alliages métalliques complexes*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, février 2013.
- [SDD07] Dominique SCARAVETTI, Patrice DUBOIS et Robert DUCHAMP : Qualification of rapid prototyping tools : proposition of a procedure and a test part. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(7-8):683–690, octobre 2007.

- [SH01] Sangarappillai SIVALOGANATHAN et Peter HILLS : Design for excellence. *Journal of Engineering Design*, 12(1):1–2, 2001.
- [SHL11] A. B. SPIERINGS, N. HERRES et G. LEVY : Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. *Rapid Prototyping Journal*, 17(3):195–202, avril 2011.
- [SP14] Kaijima SAWAKO et Michalatos PANAGIOTIS : Site officiel de topostruct, 2014. <http://sawapan.eu/>.
- [ST97] S. SMITH et J. TLUSTY : Current trends in high-speed machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119(4B):664–666, novembre 1997.
- [TBT95] M TOLLENAERE, Ph BELLOY et S TICHKIEWITCH : A part description model for the preliminary design. *Advanced CAD/CAM Systems–State-of-the-art and future trends in feature technology*, 1995.
- [TH03] KMB TAMINGER et RA HAFLEY : Electron beam freeform fabrication : a rapid metal deposition process. In *Proceedings of the 3rd annual automotive composites conference*, volume CD-ROM, Troy, Michigan, septembre 2003.
- [Tho10] Daniel THOMAS : *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*. Thesis, University of Wales, mai 2010.
- [TVC⁺10] Lore THIJS, Frederik VERHAEGHE, Tom CRAEGHS, Jan Van HUMBEECK et Jean-Pierre KRUTH : A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Acta Materialia*, 58(9):3303–3312, mai 2010.
- [VVV11] Benjamin VAYRE, Frédéric VIGNAT et François VILLENEUVE : Etat des lieux des technologies de fabrication additive métallique. In *Actes du 12ème Colloque National AIP PRIMECA, Le Mont Dore, 29 Mars- 1er avril 2011 : Produits, Procédés et Systèmes Industriels : intégration Réel-Virtuel*, page 9, Le Mont Dore, France, 2011. 9 pages CI CI.
- [VVV12a] B. VAYRE, F. VIGNAT et F. VILLENEUVE : Designing for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 3:632–637, 2012.
- [VVV12b] Benjamin VAYRE, Frédéric VIGNAT et François VILLENEUVE : Metallic additive manufacturing : state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry*, 13(02):89–96, 2012.
- [VVV13] Benjamin VAYRE, Frédéric VIGNAT et François VILLENEUVE : Identification on some design key parameters for additive manufacturing : Application on electron beam melting. *Procedia CIRP*, 7:264–269, 2013.
- [Woh11] Terry T WOHLERS : *Wohlers report 2011 : additive manufacturing and 3D printing state of the industry annual worldwide progress report*. Wohlers Associates, Fort Collins, Col., 2011.
- [Woh12] Terry WOHLERS : *Wohlers Report 2012*. Wohlers Associates, Fort Collins, Col., mai 2012.
- [WWBM10] W. P. de WILDE, Willy Patrick WILDE, C. A. BREBBIA et Ülo MANDER : *High Performance Structures and Materials V*. WIT Press, 2010.

- [XSA01] Xiaorong XU, Emanuel SACHS et Samuel ALLEN : The design of conformal cooling channels in injection molding tooling. *Polymer Engineering & Science*, 41(7):1265–1279, juillet 2001.
- [XWL01] F. XU, Y. S. WONG et H. T. LOH : Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 19(5):283–296, 2001.
- [YBS07] I. YADROITSEV, Ph. BERTRAND et I. SMUROV : Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied Surface Science*, 253(19):8064–8069, 2007.
- [YGYS10] I. YADROITSEV, A. GUSAROV, I. YADROITSAVA et I. SMUROV : Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(12):1624–1631, septembre 2010.
- [YTG⁺05] A. YAKOVLEV, E. TRUNOVA, D. GREVEY, M. PILLOZ et I. SMUROV : Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects. *Surface and Coatings Technology*, 190(1):15–24, janvier 2005.
- [YYBS12] Igor YADROITSEV, Ina YADROITSAVA, Philippe BERTRAND et Igor SMUROV : Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks. *Rapid Prototyping Journal*, 18(3):201–208, avril 2012.

Annexe A

Communications scientifiques

Lors de ce travail de thèse, nous avons effectué quatre communications scientifiques :

- l'article de conférence *Etat des lieux des technologies de fabrication additive métallique*, présenté lors du *Colloque National AIP PRIMECA* en 2011 au Mont Dore [VVV11], fait l'état de l'art des procédés et des axes de recherches en fabrication additive métallique.
- l'article *Metallic additive manufacturing : state-of-the-art review and prospects*, publié dans la revue *Mechanics & Industry* en 2012 [VVV12b], est un état de l'art des procédés et des axes de recherches en fabrication additive métallique. Cet article, auquel nous faisons référence dans le chapitre 1, est disponible ci-après.
- l'article de conférence *Designing for Additive Manufacturing*, présenté lors de la conférence *CIRP Conference on Manufacturing Systems* en 2012 à Athènes [VVV12a], présente la structure de la démarche de conception proposée, ainsi qu'une partie de l'exemple de reconception de l'équerre aéronautique du chapitre 4 (menée sans l'usage d'outils d'optimisation topologique),
- l'article de conférence *Designing for Additive Manufacturing*, présenté lors de la conférence *CIRP Conference on Manufacturing Systems* en 2013 à Setubal [VVV13], présente nos travaux sur la caractérisation expérimentale des contraintes de fabrication du procédé EBM.

Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects

BENJAMIN VAYRE^a, FRÉDÉRIC VIGNAT^b AND FRANÇOIS VILLENEUVE^c

Grenoble-INP/UJF-Grenoble 1/CNRS, G-SCOP UMR 5272, 46 avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble, France

Received 5 October 2011, Accepted 17 January 2012

Abstract – Additive manufacturing processes, used for more than 25 years, are no longer confined to rapid prototyping applications. Mostly used nowadays in niche markets (medical applications, aerospace...) to manufacture metallic parts, they should provide improvements in terms of time-to-market, ecological impact and design compared to traditional industrial processes. Current metallic additive manufacturing studied in this paper are Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Direct Metal Deposition. The performances of these processes are investigated through criteria derived from the time cost quality triangle and some prospects concerning these processes are given.

Key words: Rapid manufacturing / additive manufacturing / laser sintering / laser melting / electron beam melting / direct metal deposition

Résumé – États des lieux des technologies de fabrication additive métallique. Les procédés de fabrication additifs, qui existent depuis près de 25 ans, ne sont plus aujourd'hui réservés au seul prototypage rapide. Aujourd'hui utilisés dans des marchés de niche (monde médical, aérospatial, ...) pour fabriquer des pièces métalliques, ils laissent entrevoir d'importants gains en termes de temps de mise sur le marché, de réduction d'impact environnemental des produits manufacturés et de possibilités concernant la réalisation de formes complexes impossibles à réaliser actuellement. Les technologies de fabrication additive métallique étudiées dans cet article sont le frittage sélectif Laser (SLS), le frittage sélectif Laser direct (DMLS), la fusion sélective Laser (SLM), la fusion par faisceau d'électrons (EBM) et la construction Laser additive directe (DMD). Leurs performances sont analysées par rapport à des critères dérivés du triptyque industriel qualité-coût-délai. Enfin, nous concluons sur les actions à mener pour continuer à faire émerger ces procédés dans l'industrie.

Mots clés : Production rapide / fabrication additive / frittage Laser / fusion Laser / fusion par faisceau d'électrons / conception laser additive directe

1 Introduction

Traditional manufacturing technologies are based on multi-stage processes. The first stage deals with the rough part creation and the following stages usually consist in material removal operations. Creating a metallic rough part from raw material and later removing most of its volume can be found outdated. Moreover, each stage of the manufacturing process can take place in a different location hence generating transportation and thus energy

consumption. Additive manufacturing technologies can build fully functional parts in a single operation without wasting much raw material. These processes seem promising since they also could give the designers more freedom concerning the geometrical entities that can be manufactured.

Knowing how these manufacturing processes fare compared to conventional ones is a crucial question. Although this question is yet to be answered, in this paper the foundations needed to answer it will be laid out. At first, the different current additive manufacturing processes with their strong and weak spots will be presented. Then the characteristics of these processes in relation to the most important criteria to evaluate manufacturing processes

^a Corresponding author:
benjamin.vayre@g-scop.inpg.fr

^b Associate Professor.

^c Professor.

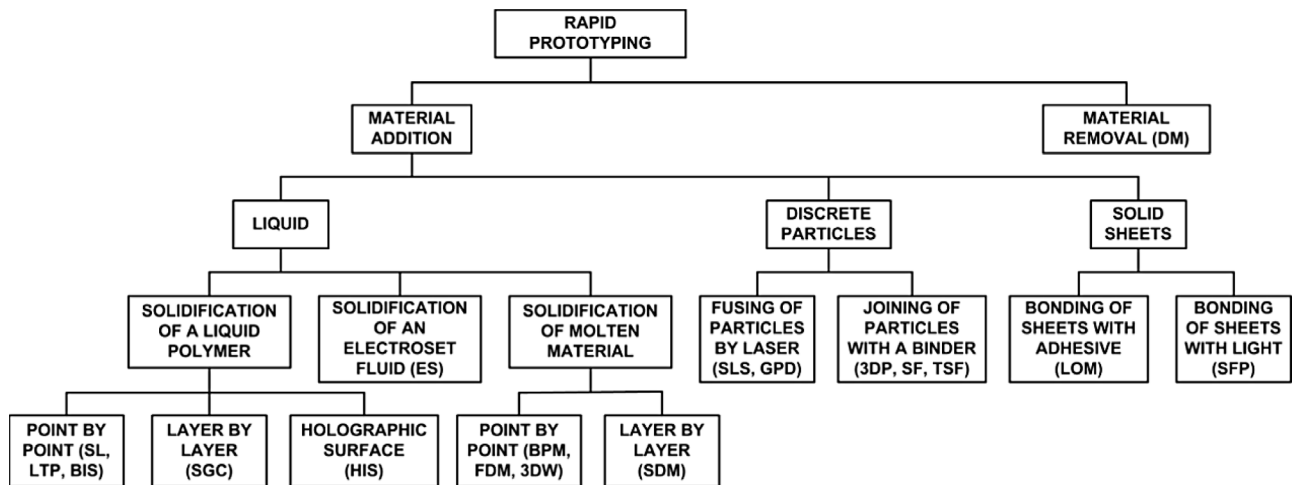


Fig. 1. Classification of different additive manufacturing technologies [2].

will be studied. To conclude, the results will be synthesized and some prospects on the future of these technologies and the conditions to their success will be proposed.

2 Definition

Additive manufacturing processes have existed for almost 25 years, i.e. stereolithography (SL), fused deposition material (FDM) and laminated object manufacturing (LOM) were invented in the late 1980's. Many other processes followed and were quickly adopted for rapid prototyping. The prototypes were built from polymer, wood or paper. With the diversification of additive processes together with the widening of available materials, it is now possible to directly manufacture metallic parts which meet the designer's specifications, in terms of shape (geometry), material and mechanical behavior. Rapid Prototyping is becoming Rapid Manufacturing.

Additive manufacturing can either be direct or indirect (Rapid Tooling). Direct additive manufacturing processes allow to manufacture end-use parts (or parts needing few post treatments) through deposition of either metallic alloy, plastic or ceramic material.

3 Direct metallic additive manufacturing processes

There are several ways to classify additive manufacturing processes. The first classification is made according to the type of material used to build up the part [1]. Another classification can be done according to the state of the raw material: liquid, discrete particle or solid sheet (Fig. 1).

For liquid and solid state raw materials the choice is limited to polymer (Stereolithography, Polyjet, and Fused Deposition Material), paper (Laminated Object Manufacturing) and wood (Stratoconception). Metallic raw materials for additive manufacturing only come under powder

state. This paper will focus on direct metallic additive manufacturing and thus on the use of metallic powders. The processes presented in this paper are based either on layer or direct deposition.

3.1 Layer-based metallic additive manufacturing

Layer-based processes start from a 3D model of the part which is sliced into 20–150 μm -thick cross-sections. These sections are built one at a time, in an inert atmosphere or partial vacuum. An energy source (laser or electron beam) is used to scan each layer of powder to bind the material. After the section has been scanned, the piston of the building chamber is moved down and a roller deposits and presses down a new layer of powder. This process is repeated until the part is completed (Fig. 2). Once built, the part (or parts) is separated from the unbound powder and cleaned. The remaining powder is filtered and stored to be used for the upcoming fabrications.

These processes have specific constraints such as using supports. Their purpose is to prevent the collapse of molten (or sintered) metal inside the powder bed when manufacturing large overhanging surfaces, as well as dissipating the heat. The supports are generated during the pre-processing phase and made from the same material than the part (contrary to photopolymer based processes where different materials can be used). They are removed through mechanical operations upon completion of the part.

To improve the building rate of these processes, the building chamber is usually heated to minimize the quantity of energy to be brought at the focal point. The different layer based processes studied bind the particles via multiple mechanisms (Fig. 3). The particles are either fully melted (SLM, EBM, DMD) or partially melted (SLS, DMLS) using laser or electron beam as a source of energy.

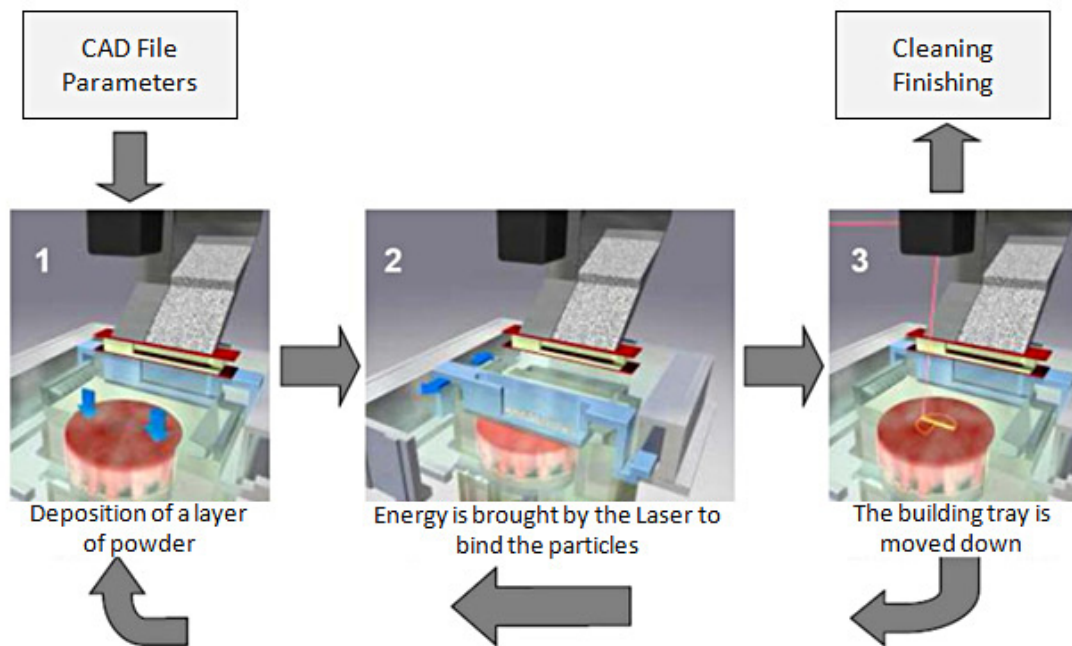


Fig. 2. Layer based fabrication's principle [Trumpf].

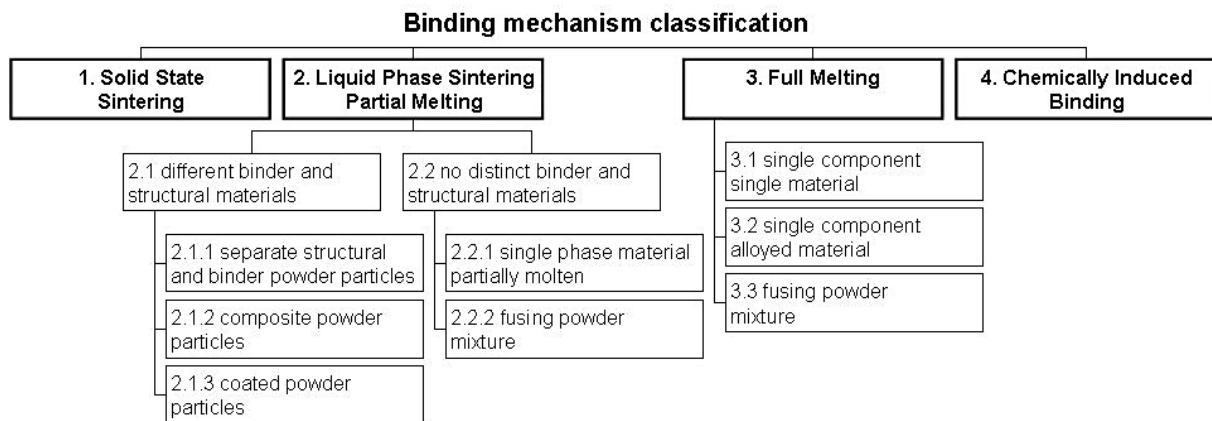


Fig. 3. Binding mechanism of additive manufacturing processes [3].

3.1.1 Selective laser sintering

The first powder-bed based process invented was SLS. It was patented by Ross Householder in 1979 and started to be sold in 1992 by DTM Corporation. Initially the only available material was polymer powder, either amorphous or semi-crystalline (case 2.2.1 in Fig. 3). Since the 1990's, DTM widened the range of available materials by adding reinforced polymers (2.1.1 and 2.1.3), as well as using other materials coated with polymer.

These new materials include ceramics, used to produce casting molds and cores, and metallic alloys. After the fabrication is completed, the part is placed in an oven to vaporize the binding polymer, sinter the part and infiltrate it with a molten metal with a lower fusion temperature (such as bronze) to improve the mechanical behavior of the part and fill in porosities [4].

This process, mainly used for rapid prototyping but also for rapid manufacturing, has a high building speed [5] but a long curing phase.

3.1.2 Direct metal laser sintering

In the 90's, EOS developed a variant of SLS able to build metallic parts without using polymer to bind the particles (2.2.1 and 2.2.2 in Fig. 3) hence removing the curing phase. The energy brought by the Laser melts the peripheral region of the particle while its core remains solid. The molten metal acts as a binder, creating gates between the particles. The powder can include several metals, in that case, the metal with the lowest fusion temperature acts as the binder.

Due to the binding mechanism, the parts are porous with reasonable mechanical properties [5]. This

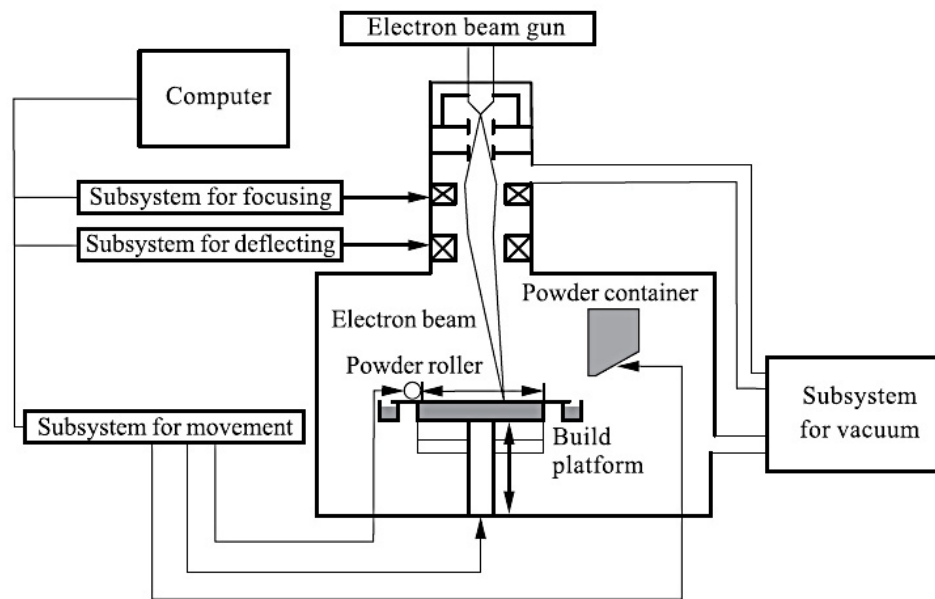


Fig. 4. EBM's principle [8].

characteristic proves useful to manufacture filters or gas storage systems for example. To obtain fully dense or gas proof parts, an infiltration is required.

3.1.3 Selective laser melting

SLM is based on the use of more powerful laser than both SLS and DMLS. The density of energy at the building spot is high enough to fully melt the powder. The parts manufactured have no or few porosities (if the gap between the scanning paths is small enough). The optimization of the parameters is crucial to obtain good surface quality [6,7]. Due to the higher temperature involved, shrinkage affects the parts, as well as thermal distorsion.

3.1.4 Electron beam melting

Electron Beam Melting was made commercial by Arcam in 1997. This process is similar to SLM with a difference on the nature of the energy source: an electron beam instead of a laser (Fig. 4). The lack of moving parts to guide the building spot makes high scanning speed possible (up to several kilometers per second). Moreover, the increase of the energy density at the building spot allows the use of a large variety of metallic alloys. These two factors explain the high building speed. This process also doesn't require any specific curing operation. Due to the large quantity of energy absorbed by the part, shrinkage takes place. The scanning strategy proves an important factor to minimize heat diffusion inside the powder bed and to improve the part's quality [8].

3.2 Direct metal deposition

Direct metal deposition consists in spraying the metallic powder directly onto a laser beam (usually a kilo-watt CO₂ laser) (Fig. 5). The molten drops are then used to build the parts. Various metallic alloys are available and it is possible to gradually and continuously change from a material to another one while manufacturing. This particularity makes possible the manufacture of multimaterial parts. The nozzle is usually mounted onto a 5 axis CNC structure to produce complex parts. In that case, a pre-processing phase is required to generate the nozzle trajectories. This generation is complex due to its high influence on the final result.

Contrary to layer based processes where the thickness of each layer is constant, the thickness of the DMD joint depends on the speed of the nozzle and on the rate of material deposition. The rate of material deposition depends on multiple parameters: powder flow, Laser power, gas flow... Any difference between the manufactured and expected thickness can cause the failure of the construction since the distance between the nozzle and the surface can slowly grow, and that consequently the molten particles solidify before reaching the part. To prevent this phenomenon, an optical system can be used to monitor the distance between the nozzle and the part (Fig. 5).

Initially designed for remanufacturing or repair by material addition, this process can be used to manufacture end user parts with high added value.

4 Evaluating the metallic additive manufacturing processes

Numerous papers focus on designing test parts and evaluating metallic additive manufacturing processes [5, 9,10]. Due to the large variety of processes, these studies

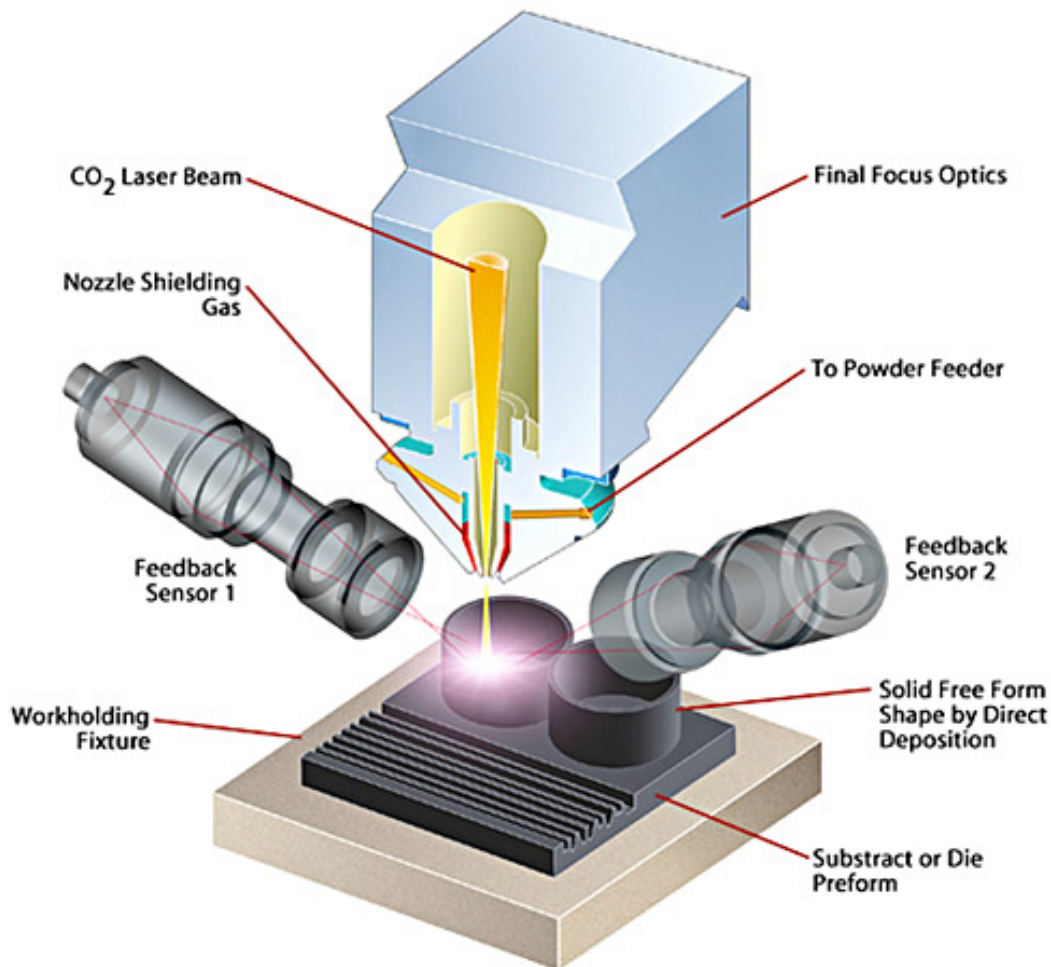


Fig. 5. DMD's principle [POM].

prove difficult to use and show partial results. The main criteria used to evaluate a process can be derived from the time – cost – quality triangle. This triangle can today become a square by addition of the environmental impact. In this paper the proposed manufacturing processes will be compared regarding these 4 criteria.

4.1 Quality

4.1.1 Surface quality

Parts manufactured with this kind of processes generally have a granular aspect due to the binding of unmolten particles on the exterior of the parts. The arithmetic rugosity of the surfaces is below $15\ \mu\text{m}$ for the powder bed based processes. The surfaces build with SLS (and with DMLS + infiltration) have a better quality than the ones made through SLM and unfiltered DMLS, thanks to the infiltration which smoothens the surfaces [5]. The arithmetic rugosity of EBM made parts is usually between 25 and $35\ \mu\text{m}$ (according to Arcam) whereas DMD produces smoother surfaces with R_a between 10 and $25\ \mu\text{m}$ (according to POM).

4.1.2 Dimensional quality

SLS, DMLS and SLM processes produce parts with dimensional errors of less than $0.1\ \text{mm}$ for a $100\ \text{mm}$ length (3D system). EBM dimensional precision is half as good whereas DMD's is three times worse (POM). This is just an estimate since smaller additive manufacturing machines exist for several processes (for instance, Easy-clad sells two DMD nozzles: Macro-Clad for large parts and Meso-Clad for small ones) which produce parts with better dimensional and surface quality. On a general note, when good surface or dimensional quality is needed, finishing operations are necessary.

4.1.3 Materials and mechanical properties

RM has been widening the range of available material since its invention. Nowadays, it's possible to build parts with CNC like material [13] and some processes can manufacture multi-material parts [14]. The increase in power of the Laser sources used in SLS, DMLS and SLM allow the use of high melting point metallic alloys. The mechanical properties of the sintered and molten material tend to be similar or even better than the machined one, the microstructure being more and more controlled [15, 16].

4.2 Time

Few studies focus on the manufacturing speed of different RM processes since it's difficult to build a part under the same conditions on different manufacturing processes. The data below are given by the manufacturers for machines able to build “medium sized” parts (the building volume has dimensions of at least 200 mm × 200 mm × 200 mm).

Additive manufacturing processes based on sintering, SLS (10–100 cm³/h) and DMLS (7–70 cm³/h) are fairly faster than SLM (5–20 cm³/h). DMD (10–70 cm³/h) and EBM (55–80 cm³/h) are able to produce non-porous parts, as SLM does, with a higher building speed. This data is usually measured with maximum layer thickness (except for DMD, not layer-based). When producing parts, to minimize stair effect [11] on complex parts, hence limiting the finishing operations, smaller layer thickness should be chosen. Real building speed will then often be closer to the lower given value and can even be lower since the speed also depends on the material used.

SLS and DMLS processes, though having similar building speed than EBM and DMD processes, require an infiltration to obtain nearly fully dense parts [4]. The fastest processes to manufacture parts without specific finishing operations are EBM and DMD processes.

EBM allows the user to change the diameter of the building spot diameter from 200 μm to 1 mm. With this process, it's possible to build small entities as well as fill in quickly large volumes (compared to SLM for example where the focal spot has a fixed diameter of 70 μm). To have the same flexibility on laser based processes, machines with multiple laser are experimented to have multiple scanning spot at the same time [12].

4.3 Cost

Manufacturing cost depends on machine operating cost, raw material and consumables costs, manufacturing time... with all the parameters varying based on the use and type of the machine. On a general level, for a medium building chamber volume, sintering-based processes are the least expensive whereas EBM and DMD are the most expensive. The high price of these machines is balanced by the very short pre-production phase for small series. The price of metallic powders is greatly impacted by the atomization process which reduces the price difference between different alloys.

4.4 Environmental impact

About 95 per cent (according to Arcam) of the unused powder can be filtered and used again right away. Moreover the ability to manufacture less massive parts and/or closer to the designer's wishes is very interesting for eco-designers [17]. The environmental impact of several SLS and SLM machines manufacturing a test part was quantified [18] and shows that the fabrication impact can't be



Fig. 6. Hip replacement manufactured by SLM.

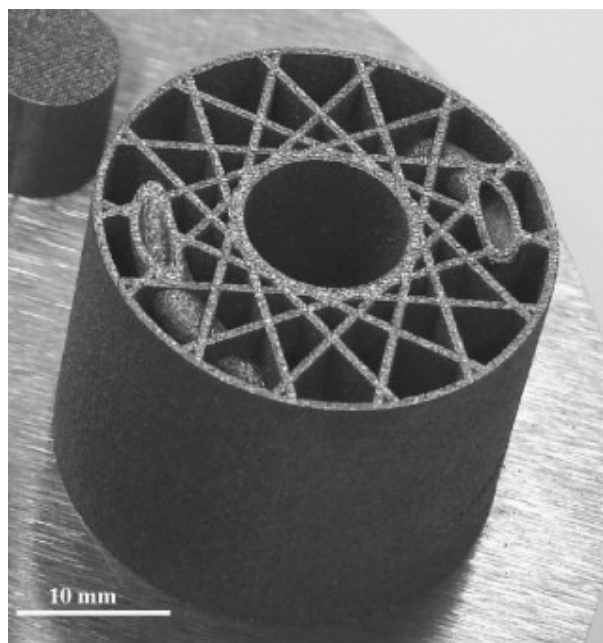


Fig. 7. Example of optimized inner structure built with SLM [19].

disregarded compared to extraction and creation phases. It would be interesting to compare these performances to those of traditional mechanical processes. Newly-built parts only need the cleaning of the remaining powder (contrary to stereolithography where solvents are used) which contributes to the limitation of waste generation. To obtain good surface quality, finishing operations are usually needed.

4.5 Synthesis

Technology	SLS	DMLS	SLM	EBM	DMD
Manufacturer	3D system – DTM Corp.	EOS GmbH	3D system – MTT	Arcam	POM – Easyclad
Maximal building volume* (in mm ³)	550 × 550 × 750	250 × 250 × 215	400 × 400 × 400	200 × 200 × 350	300 × 300 × 300
Building speed* (in cm ³ /h)	10–100	7–70	5–20	55–80	10–70
Post-process operations	Cleaning (infiltration) (finishing)	Cleaning (infiltration) (finishing)	Cleaning (finishing)	Cleaning (finishing)	(finishing)
Layer thickness*	20–150 μm	20–100 μm	20–100 μm	50–200 μm	–
Rugosity (in μm)	Ra 2 [5]	Ra 11 [5]	Ra 11 [5]	Ra 25–35*	Ra 10–25*
Dimensional quality*	0.2* mm	0.1–0.2* mm	0.2* mm	0.4* mm	0.3* mm
Available metallic materials*	Any coated material	Steels, cobalt-chrome, aluminum, bronze, titanium.	Steels, cobalt-chrome, aluminum, bronze, titanium.	Steels, cobalt-chrome, aluminum, bronze, titanium, inconel, copper, beryllium, niobium, ...	Steels, inconel, copper, titanium, ...

* Manufacturer data (3D system, EOS GmbH, Arcam, POM).

5 Conclusion

Metallic additive manufacturing is already used to produce unique or small series of complex parts, particularly to build medical prosthesis (Fig. 6).

To continue spreading in the mechanical industries, rapid manufacturing processes should continue to improve their performances in terms of speed, precision and exploitation costs. Using these processes should now be considered from the early designing phases to take advantage of the freedom of the buildable shapes which can lead to building less massive or more functional parts (Fig. 7). Current CAD tools and, more generally, the numerical chain should change to take into account the new features of rapid manufacturing built parts: multimaterial parts, inner structures, colored surfaces (with 3D printing for instance), etc. [20]. In addition, the question of the environmental impact of these manufacturing technologies is still unanswered. It should be investigated through several case studies assess their strengths.

References

- [1] G.N. Levy, R. Schindel, J. Kruth, Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative techniques, applications, and development trends, *CIRP Annals – Manuf. Technol.* 52 (2003) 589–609
- [2] D. Pham, R. Gault, A comparison of rapid prototyping technologies, *Int. J. Machine Tools Manuf.* 38 (1998) 1257–1287
- [3] J. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T. Childs, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *CIRP Annals – Manuf. Technol.* 56 (2007) 730–759
- [4] S. Kumar, J. Kruth, Effect of bronze infiltration into laser sintered metallic parts, *Materials & Design* 28 (2007) 400–407
- [5] P.J. Kruth, B. Vandenbroucke, I.J. van Vaerenbergh, P. Mercelis, Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques, 2005
- [6] I. Yadroitsev, A. Gusarov, I. Yadroitsava, I. Smurov, Single track formation in selective laser melting of metal powders, *J. Mater. Proc. Technol.* 210 (2010) 1624–1631
- [7] I. Yadroitsev, P. Bertrand, I. Smurov, Parametric analysis of the selective laser melting process, *Appl. Surf. Sci.* 253 (2007) 8064–8069
- [8] W. Lu, F. Lin, J. Han, H. Qi, N. Yan, Scan strategy in electron beam selective melting, *Tsinghua Science & Technology* 14 (2009) 120–126
- [9] F. Xu, Y.S. Wong, H.T. Loh, Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing, *J. Manuf. Sys.* 19 (2001) 283–296
- [10] D. Scaravetti, P. Dubois, R. Duchamp, Qualification of rapid prototyping tools: proposition of a procedure and a test part, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 38 (2007) 683–690
- [11] D. Ahn, H. Kim, S. Lee, Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing, *J. Mater. Proc. Technol.* 209 (2009) 664–671
- [12] H. Kim, K. Choi, Y. Doh, D. Kim, Fabrication of parts and their evaluation using a dual laser in the solid freeform fabrication system, *J. Mater. Proc. Technol.* 209 (2009) 4857–4866
- [13] J. Kruth, L. Froyen, M. Rombouts, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, New ferro powder for selective laser sintering of dense parts, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 52 (2003) 139–142

- [14] A. Yakovlev, E. Trunova, D. Grevey, M. Pilloz, I. Smurov, Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects, *Surface and Coatings Technology* 190 (2005) 15–24
- [15] L. Murr et al., Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V, *Materials Characterization* 60 (2009) 96–105
- [16] S. Biamino et al., Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation, *Intermetallics*
- [17] O. Diegel, S. Singamneni, S. Reay, A. Withell, Tools for Sustainable product design: additive manufacturing, *J. Sustainable Development* 3 (2010) 68–75
- [18] K. Kellens, W. Dewulf, E. Yasa, J. Duflou, Environmental analysis of SLM and SLS manufacturing processes, *Proceeding of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 17 location: Hefei, China date: 2010, pp. 423–428
- [19] I. Yadroitsev, L. Thivillon, P. Bertrand, I. Smurov, Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder, *Appl. Surf. Sci.* 254 (2007) 980–983
- [20] R. Bonnard, P. Mognol, J. Hascoët, A new digital chain for additive manufacturing processes, *Virt. Phys. Prototyp.* 5 (2010) 75

Annexe B

Calcul du coût de revient d'une pièce mécanique

B.1 Coût de revient technique pour les procédés traditionnels

Le modèle de coût de revient technique est issu d'une notice des Techniques de l'Ingénieur [FDC99]. Le coût de revient technique est la somme des coûts de fabrication, de fourniture de la matière première et des sous-traitances éventuelles (B.1). Le coût de fabrication dépend, lui, du coût de préparation de la fabrication, ainsi que du coût d'utilisation de la machine. Ce dernier prend en compte l'amortissement et les frais de fonctionnement de la machine considérée.

$$C_{\text{revient}} = C_{\text{fourniture}} + C_{\text{sous-traitance}} + C_{\text{fab}} \quad (\text{B.1})$$

Les paramètres utilisées dans les formules sont expliqués dans le tableau suivant :

Élément	Abréviation	Unité
Amortissement	A	€/h
Coût de fabrication	C_{fab}	€
Coût de fourniture	$C_{fourniture}$	€
Coût horaire chargé de main d'œuvre	CS	€/h
Coût de préparation à la fabrication	C_{prepa}	€
Coût de revient technique	$C_{revient}$	€
Coût de sous-traitance	$C_{sous-traitance}$	€
Coût d'utilisation machine	C_{util}	€
Durée d'utilisation machine	t	h
Frais de fonctionnement	R	€/h
Frais d'entretien annuels	F_r	€/an
Loyer	I	€/m ² /an
Nombre d'heures de fonctionnement	H	h/an
Nombre d'années d'amortissement	N_{annees}	an
Puissance électrique du procédé	W	kW
Prix de l'énergie	e	€/kWh
Prix de la machine	P_m	€
Surface occupée par la machine	S_m	m ²
Taux d'intérêt	$T_{interet}$	%

Le coût de fabrication dépend des coûts de préparation et d'utilisation (B.2).

$$C_{fab} = C_{prepa} + C_{util} \quad (B.2)$$

$$= C_{prepa} + t \cdot (A + R) \quad (B.3)$$

$$= C_{prepa} + t \cdot \left(\frac{P_m}{H \cdot N_{annees}} + \frac{P_m \cdot T_{interet}}{2 \cdot N_{annees}} \right) + t \cdot \left(\frac{F_r}{H} + \frac{I \cdot S_m}{H} + 0,6 \cdot e \cdot W + CS \right) \quad (B.4)$$

Le facteur 0,6 dans l'équation (B.4) pour la consommation d'énergie correspond à l'hypothèse d'une consommation moyenne valant 60% de la consommation maximale.

B.2 Application au procédé EBM

L'approche du calcul du coût de revient technique pour les procédés conventionnels peut être appliquée à l'EBM en tenant compte de ses spécificités. L'équation de départ est identique (B.5).

$$C_{revient} = C_{fourniture} + C_{sous-traitance} + C_{fab} \quad (B.5)$$

Le coût de fourniture ne concerne plus que le coût de la matière consommée lors de la fabrication, car la poudre non fondue est réutilisée à 95% (B.6). Comme pour le modèle des procédés traditionnels, les coûts de sous-traitance ne sont pas explicités, ils peuvent comprendre des coûts de finitions sous-traitées (par exemple). Le tableau ci-après définit les paramètres utilisés dans les formules suivantes :

Élément	Abréviation	Unité
Coût massique de la poudre d'alliage	$C_{matière}$	€/kg
Masse volumique de l'alliage	ρ	kg/m ³
Coût horaire de préparation numérique	$C_{prepa-num}$	€/h
Coût horaire de préparation machine	$C_{prepa-mach}$	€/h
Coût de l'opération de dépoudrage	$C_{depoudrage}$	€
Durée d'intervention de l'opérateur	t_{ope}	h
Durée de préparation numériques	$t_{prepa-num}$	h
Durée de préparation machine	$t_{prepa-mach}$	h
Puissance moyenne	$P_{moyenne}$	kW
Volume des pièces fabriquées	V_{piece}	m ³
Volume des supports	$V_{support}$	m ³

$$C_{revient} = \frac{V_{piece} + V_{support}}{0,95} \cdot \rho \cdot C_{matière} + C_{sous-traitance} + C_{fab} \quad (B.6)$$

Le coût de fabrication (B.7) dépend de la préparation (B.8), de l'utilisation (B.9) et de l'opération de dépoudrage.

$$C_{fab} = C_{prepa} + C_{util} + C_{depoudrage} \quad (B.7)$$

$$C_{prepa} = C_{prepa-num} \cdot t_{prepa-num} + C_{prepa-mach} \cdot t_{prepa-mach} \quad (B.8)$$

Le coût horaire de préparation des fichiers numériques comprend le coût de main d'œuvre et le coût de mise en œuvre des logiciels utilisés. Le coût horaire de préparation de la machine tient également compte de la main d'œuvre, mais aussi des consommables utilisés à chaque fabrication : EPI, plaques de protection contre la métallisation, etc.

$$C_{util} = t \cdot (A + R) \quad (B.9)$$

$$= t \cdot \left[\left(\frac{P_m}{H \cdot N_{années}} + \frac{P_m \cdot T_{interet}}{2 \cdot N_{années}} \right) + \left(\frac{F_r}{H} + \frac{I \cdot S_m}{H} + e \cdot P_{moyenne} \right) \right] + t_{ope} \cdot CS \quad (B.10)$$

L'expression du coût de revient technique est donc donné par l'équation (B.11).

$$C_{revient} = \frac{V_{piece} + V_{support}}{0,95} \cdot \rho \cdot C_{matière} + C_{sous-traitance} + C_{depoudrage} + t \cdot \left[\left(\frac{P_m}{H \cdot N_{années}} + \frac{P_m \cdot T_{interet}}{2 \cdot N_{années}} \right) + \left(\frac{F_r}{H} + \frac{I \cdot S_m}{H} + e \cdot P_{moyenne} \right) \right] + t_{ope} \cdot CS \quad (B.11)$$

Vu la faible quantité d'énergie consommée (inférieure à 6kW), nous pouvons faire l'hypothèse d'une consommation moyenne afin d'obtenir un coût horaire de l'énergie. Les phases de préparation et de nettoyage de la machine sont généralement similaires pour chaque lancement de fabrication, la durée consacrée par l'opérateur est donc semblable. Avec ces hypothèses, nous obtenons la formule (B.12).

$$C_{revient} = \frac{V_{piece} + V_{support}}{0,95} \cdot \rho \cdot C_{matiere} + C_{sous-traitance} + C_{prepa} + C_{depoudrage} +$$

$$t \cdot (C_{amortissementetloyer} + C_{energie}) + t_{ope} \cdot CS \quad (\text{B.12})$$

Annexe C

Cas d'étude : décapsuleur

Cette annexe propose un deuxième cas d'étude complémentaire à celui proposé au chapitre 4. Ce cas illustre la difficulté de concevoir des pièces légères.

C.1 Pièce étudiée

La pièce support est un porte-clef décapsuleur. Ce type de pièce est souvent réalisé par découpe Laser ou découpe jet d'eau à partir de plaques. La pièce présentée sur la figure C.1 est réalisée en alliage d'aluminium et a une masse de 7 g.



FIGURE C.1 – Décapsuleur en Aluminium fabriqué par découpe jet d'eau d'une plaque de 8 mm d'épaisseur

Cette pièce doit être reconçue en vue d'une fabrication par le procédé EBM. La pièce reconçue doit être contenue dans un parallélépipède de dimensions 65 mm * 14 mm * 8 mm. Nous prendrons un coefficient de sécurité de 1,5 pour le dimensionnement (identique à celui de la pièce initiale). Le matériau utilisé est un alliage de Titane, le Ti6Al4V que nous utilisons avec notre machine.

C.2 Analyse du cahier des charges fonctionnel

Les surfaces fonctionnelles de la pièce sont illustrées sur la figure C.2, ces SF sont :

- la surface SF1 reçoit l'effort exercé par l'utilisateur sur le décapsuleur. Nous avons fait le choix, lors de la reconception, de considérer cette SF comme deux surfaces rectangulaires, afin de favoriser l'émergence de structures fines.
- la surface plane SF2 est en contact avec la partie inférieure de la capsule,
- la surface SF3 est en contact avec la partie supérieure de la capsule,
- la surface cylindrique SF4 permet l'utilisation d'un anneau pour porter le décapsuleur.

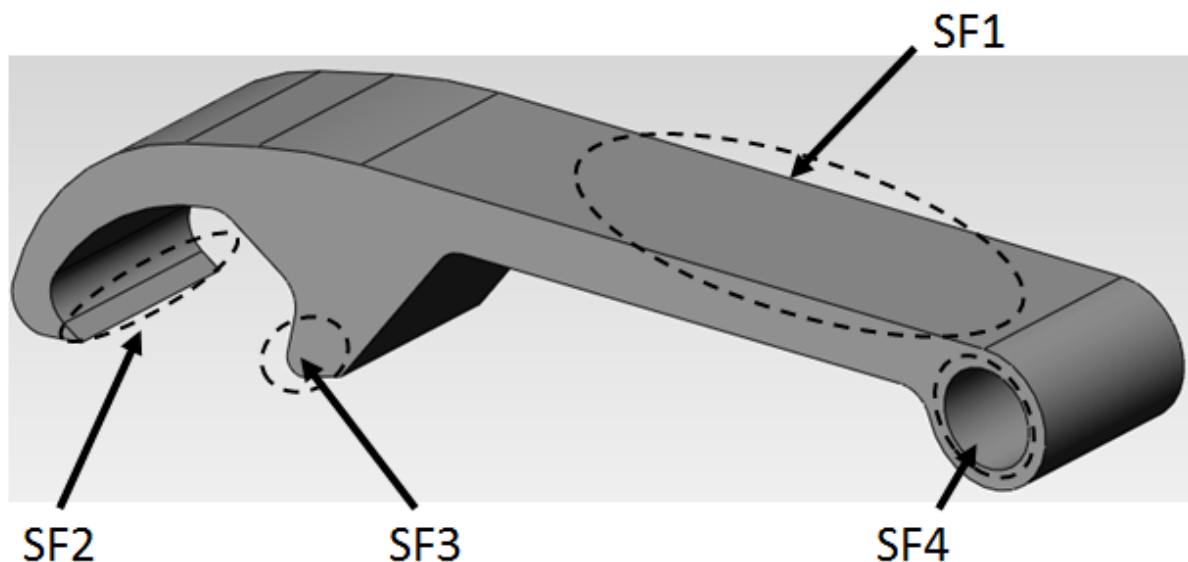


FIGURE C.2 – Représentation des surfaces fonctionnelles sur la pièce initiale

Le volume de conception pour notre pièce est une partie du volume parallélépipédique de dimensions 65 mm * 14 mm * 8 mm. En effet, le volume de conception tient compte de la présence des capsules qui seront positionnées dans la partie inférieure à gauche de la figure C.3. L'intérieur de SF4, non représenté sur la figure, ne fait également pas partie du volume de conception pour permettre de placer l'anneau du porte-clef.

Le chargement spécifié dans le cahier des charges fonctionnel est un chargement mécanique statique avec une charge répartie de 50 N sur SF1 (appliquée par l'utilisateur), afin de modéliser les actions mécaniques sur la capsule, la surface SF2 est considérée comme encastree, alors que SF3 est en liaison pivot avec le bâti. Dans le logiciel Topostruct, définir une telle liaison n'est pas possible, cette liaison est donc remplacée par un second encastrement (Figure C.3).

C.3 Génération des formes initiales

La forme initiale a été dans un premier temps générée par le concepteur à partir du modèle squelette (Figure C.3). Dans un second temps, nous avons utilisé des moyens d'optimisation topologique pour générer ces géométries.

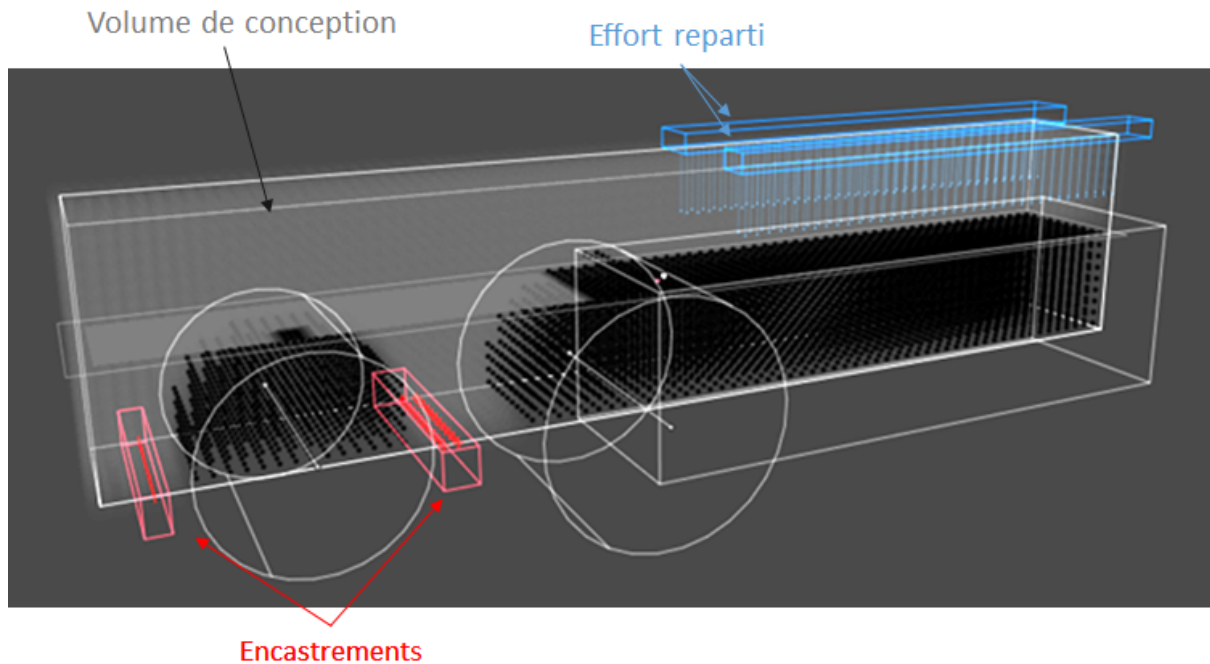


FIGURE C.3 – Représentation des conditions aux limites du chargement et du volume de conception (volume gris clair, les volumes noir ne font pas partie du volume de conception) dans le logiciel Topostruct

Approche guidée Le chargement mécanique qui est appliqué à la pièce est limité, notre objectif est donc de réaliser une pièce de très faible masse. C’est pour cette raison que nous avons opté pour une géométrie fine et complexe. Nous avons réalisé plusieurs formes, en positionnant des treillis bidimensionnels au niveau des volumes extérieurs du volume de conception. La figure C.4 montre deux d’entre elles, qui illustrent le choix effectué de l’utilisation de treillis fins et réguliers.

Optimisation topologique Nous avons utilisé le module d’optimisation topologique d’ANSYS (Figure C.5) et le logiciel Topostruct (Figure C.6) afin de générer des géométries initiales par optimisation topologique.

L’analyse avec ANSYS a été réalisée en 2D, la forme obtenue est discontinue (Figure C.5) et constitue une indication sur la géométrie de la surface projetée de la pièce. Le résultat de l’optimisation menée avec Topostruct est une forme tridimensionnelle (Figure C.6) qui donne des indications sur la répartition volumique de la matière, notamment au centre de la pièce.

C.4 Balançage des pièces et volume fabricable

Approche guidée Les modèles conçus par l’approche guidée peuvent être fabriqués verticalement pour avoir une productivité maximale et un coût réduit ou sur le côté pour limiter le temps de fabrication total. Ce deuxième balançage est plus contraignant par

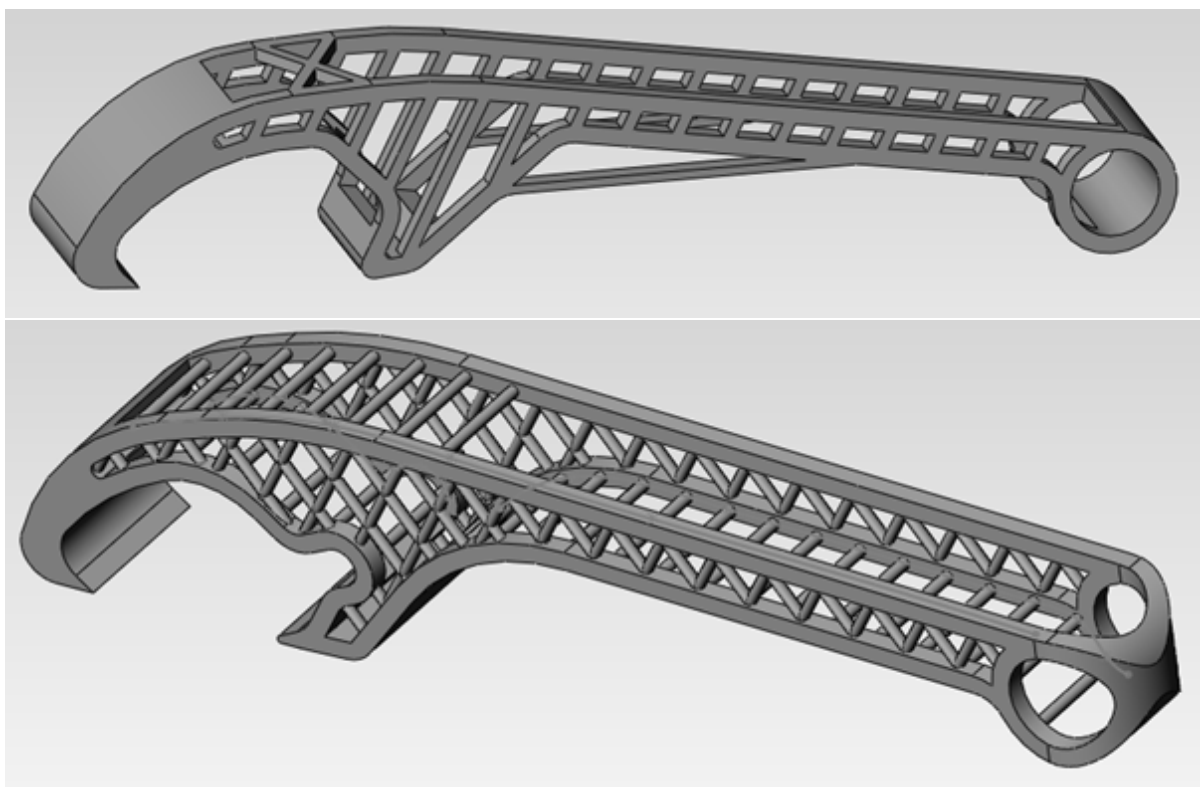


FIGURE C.4 – Deux modèles CAO différents de la forme initiale conçus à partir du modèle squelette avec l'approche guidée, pièce "a" (en haut), et pièce "b" (en bas).

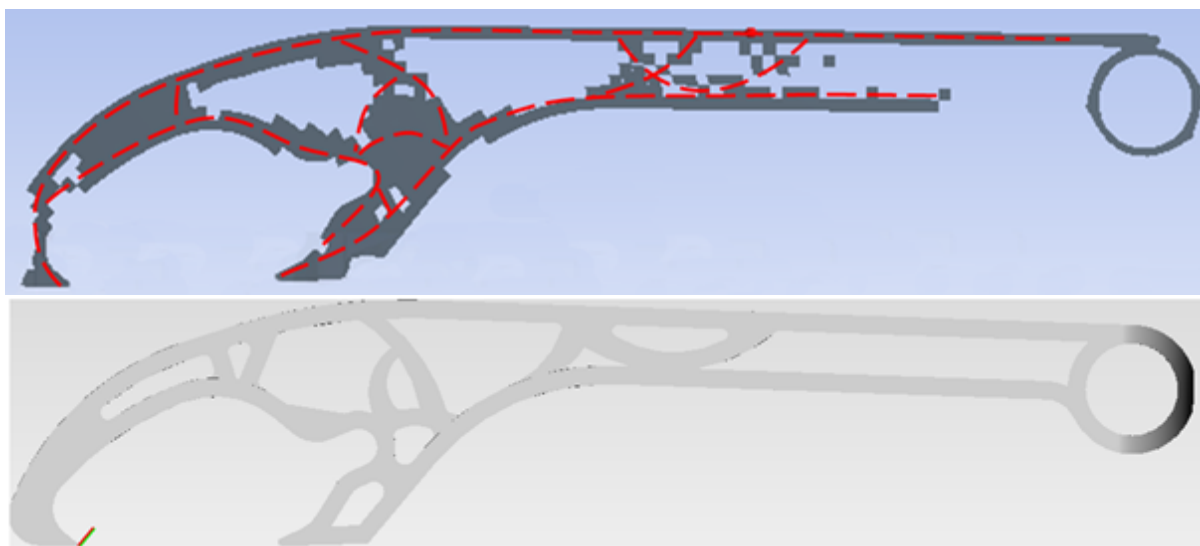


FIGURE C.5 – Résultat du calcul par optimisation topologique mené avec ANSYS (en haut) et forme reconçue à partir de ces résultats (en bas)

rapport à la problématique thermique à cause de la présence de volumes en porte-à-faux. Nous avons donc choisi le premier balancement.

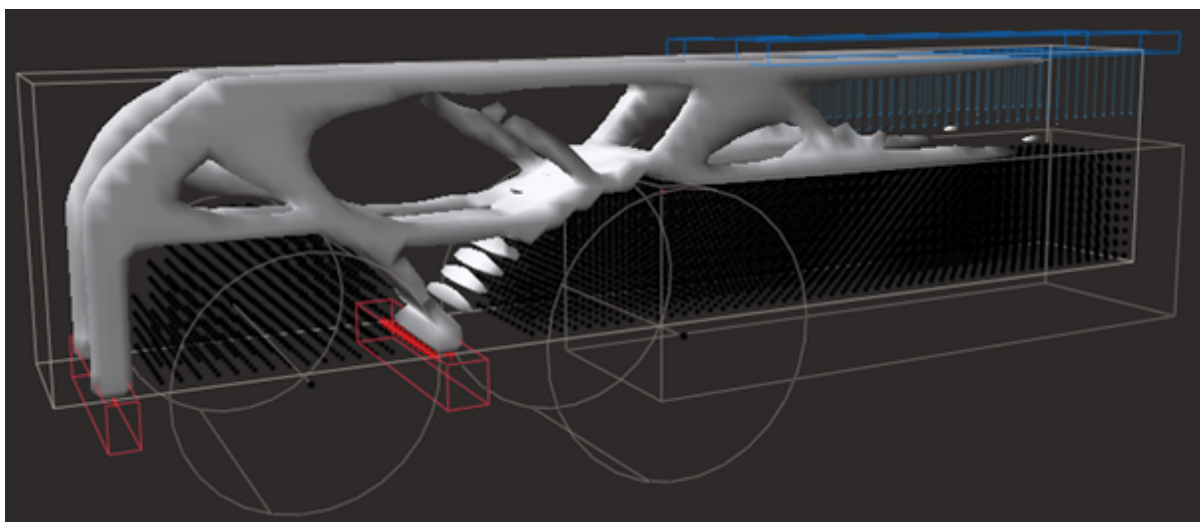


FIGURE C.6 – Résultat du calcul par optimisation topologique mené avec Topostruct

Optimisation topologique Les formes obtenues par optimisation topologique présentent des volumes fins parallèles dans le sens de la longueur de la pièce (Figure C.6). Afin de minimiser la présence de volumes en porte-à-faux, la pièce est réalisée verticalement suivant sa plus grande dimension.

C.5 Raffinement de la géométrie

L'étape de raffinement de la solution a pour but la modélisation d'une géométrie paramétrée, en vue de réaliser une optimisation paramétrique qui permette de prendre en compte des contraintes de fabrication et de réaliser le dimensionnement de la pièce. Dans le cadre de cette reconception, la définition d'une géométrie paramétrée est complexe. Tout d'abord, le cas de charge appliqué étant faible (50 N), l'épaisseur des structures fines est l'épaisseur minimale pour toutes les pièces reconçues. Le raffinement de la géométrie passe par la définition de la position et du nombre de "poutres" qui définissent la géométrie fine de la pièce. Par conséquent, la phase de raffinement de la géométrie a été menée manuellement par le concepteur en modifiant la géométrie pour diminuer la masse tout en vérifiant, par simulation par éléments finis, que la pièce respecte les exigences du cahier des charges.

Approche guidée Les modèles obtenus par la démarche guidée sont ceux qui figurent sur la figure C.4. La pièce "a" est une conception préliminaire qui ne respecte pas le volume de conception spécifié. Plusieurs itérations, entre CAO et dimensionnement, ont été menées pour aboutir à une pièce de même masse (2,9 g) qui respecte le volume de conception (pièce "b"). Ces pièces sont surdimensionnées par rapport à la sollicitation de 50 N (Figure C.7), puisque la contrainte maximale de Von Mises est de 415 MPa (par rapport aux 831 MPa de la limite élastique du Ti6Al4V) localement et qu'une grande partie de la pièce n'est que très faiblement sollicitée.

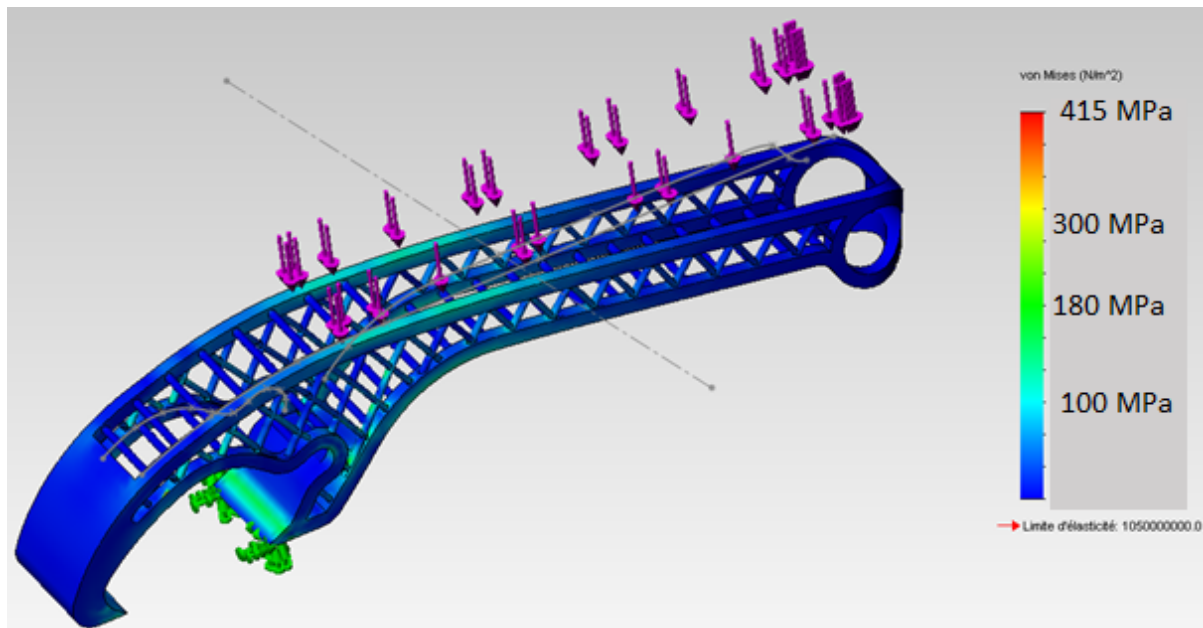


FIGURE C.7 – Vérification du dimensionnement de la forme par calcul éléments finis

Optimisation topologique Les formes obtenues par ANSYS et Topostruct ne fournissent qu'une représentation grossière de la géométrie optimisée. Là encore, le concepteur doit progresser par itération en effectuant des boucles entre la phase de CAO et celle de dimensionnement. Les indications données par Topostruct, au niveau de la répartition de matière au centre la pièce, ont permis au concepteur d'aboutir à des pièces dont les masses sont sensiblement réduites, par rapport à celles obtenues par l'approche guidée. La pièce "c" a ainsi une masse de 2,2 g et de 2,1 g pour la pièce "d" (Figure C.8). Les pièces obtenues sont surdimensionnées, avec des contraintes maximales équivalentes de Von Mises inférieures à 270 MPa. La répartition des contraintes est cependant plus homogène que pour la pièce "b".

C.6 Obtention de la géométrie finale et validation

Géométrie finale La géométrie finale n'a pas besoin d'être modifiée par rapport à la géométrie validée par éléments finis. En effet, les surfaces fonctionnelles ne sont pas parachevées, et les contraintes obtenues par simulation sont loin de la limite élastique du matériau.

Validation Les pièces ont été réalisées sur notre moyen de fabrication EBM. Le balayage vertical demande le positionnement d'une faible quantité de supports au niveau de la partie massive du décapsuleur, illustré par la figure C.9.

Toutes les pièces conçues ont été fabriquées. Pour une fabrication "en série", nous avons cependant opté pour la pièce "d" qui possède la masse la plus faible comme le rappelle le tableau suivant :

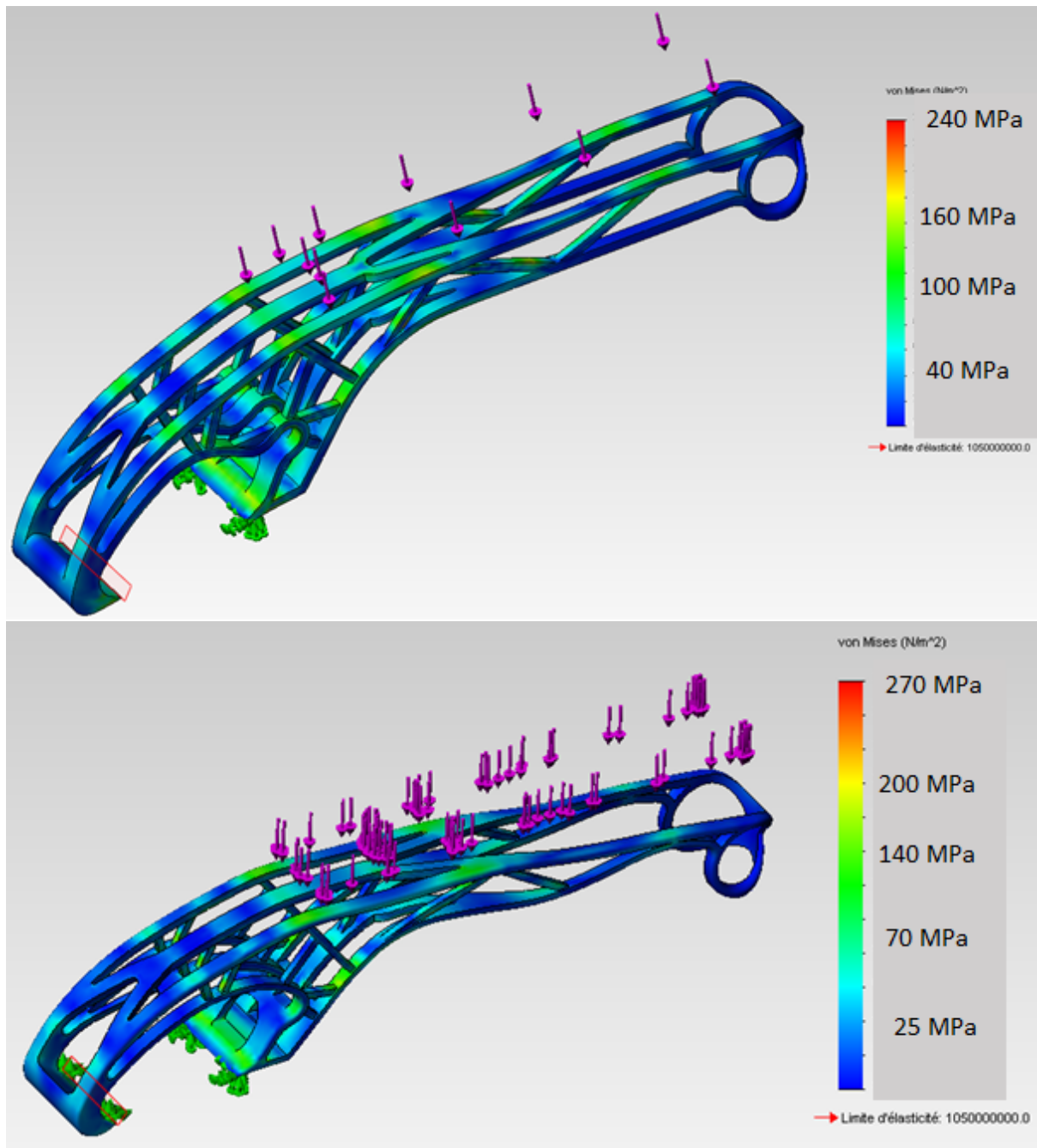


FIGURE C.8 – Vérification du dimensionnement de deux pièces conçues à partir des résultats d'optimisation topologique par calcul éléments finis, pièce "c" en haut et pièce "d" en bas

Pièce	Masse
Pièce initiale	7 g
Pièce "a"	2,9 g
Pièce "b"	2,9 g
Pièce "c"	2,2 g
Pièce "d"	2,1 g

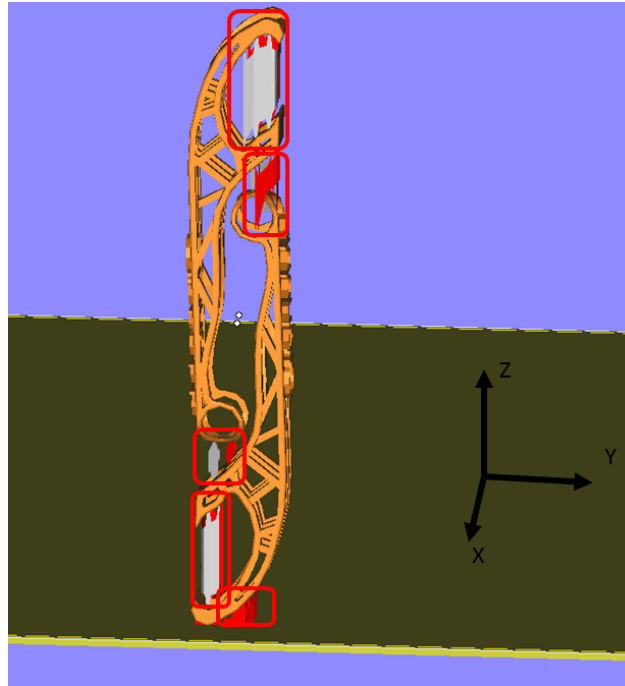


FIGURE C.9 – Positionnement des supports (encadrés en rouge) sur deux décapsuleurs réalisés verticalement, tête-bêche

Afin de fabriquer simultanément un grand nombre de pièces, nous avons choisi de balancer les pièces deux par deux, en les positionnant tête-bêche verticalement (Figure C.9). Ce balancement nécessite la présence de supports supplémentaires, mais permet la fabrication simultanée de 418 décapsuleurs (Figure C.10), ou même de 836 pièces si une autre "couche" de pièces est ajoutée à la première.

Le détail du coût de revient technique de la pièce (qui ne tient pas compte du coût de préparation numérique) est donné dans le tableau suivant :

Élément	Décapsuleur "d"
Matière	0,46 € ^a
Main d'œuvre	0,12 €
Durée machine	5,54 min ^b
Coût machine	3,70 €
Dépoudrage	1,50 € ^c
Enlèvement supports	1,30 € ^d
Coût d'une pièce	7,08 €

^a. Pour une masse de 2,3 g qui comprend la masse des supports

^b. La durée d'utilisation de la machine est de 38h37 pour les 418 pièces, dont 31h12 de réalisation des couches

^c. Au vu du grand nombre de pièces, la durée de l'opération de dépoudrage par pièce (et donc son coût) est réduite par rapport aux pièces présentées précédemment

^d. Les supports demandent environ 2 minutes de séparation manuelle par pièce

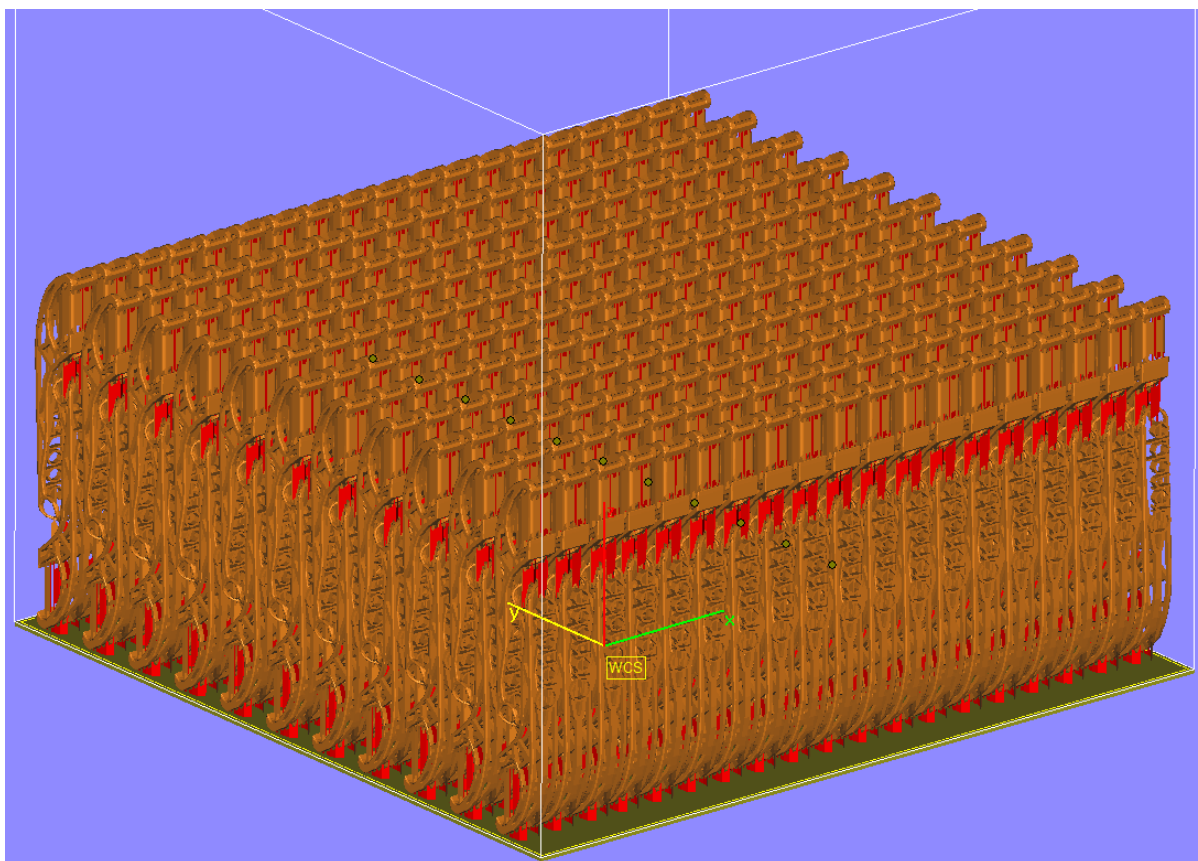


FIGURE C.10 – Lot de 418 décapsuleurs avec leurs supports prêts à être fabriqués par EBM

Le prix de revient du décapsuleur dépend majoritairement du coût d'utilisation machine, ainsi que des opérations de dépoudrage et d'enlèvement des supports. La très faible masse explique le faible poids du coût matière dans le coût de revient (environ 6%). Plusieurs centaines d'exemplaires ont été produits à des fins de communication. D'après notre utilisation sur plusieurs mois, ces pièces sont conformes aux attentes de l'utilisateur.

Résumé

Les procédés de fabrication additive sont aujourd'hui de plus en plus utilisés dans l'industrie. Parmi les différentes technologies existantes, les procédés additifs métalliques, et notamment les procédés en couches, semblent les plus prometteurs pour la conception de produits mécaniques. Des travaux ont été menés sur la thématique de la conception de produits réalisés par ces moyens. Ils traitent principalement du choix du procédé le plus adapté, de l'optimisation de formes ou présentent des applications de reconception. Il n'existe cependant pas de démarche globale de conception de produits qui permettent de prendre en compte les spécificités des procédés additifs en couches, et notamment leurs contraintes de fabrication encore peu explicitées.

Lors de ce travail de thèse, les changements introduits en conception de produits par ces procédés ont été montrés et illustrés par des pièces réalisées par EBM. De nouvelles opportunités s'offrent au concepteur, comme l'accès à l'ensemble du volume de fabrication, la capacité de fabriquer aisément des pièces complexes, la possibilité de réaliser des treillis tridimensionnels et la capacité de produire des mécanismes sans assemblage. Les contraintes de fabrication de ces procédés diffèrent de celles des procédés conventionnels. Les phénomènes thermiques lors de la fabrication impactent directement la fabricabilité et la qualité des pièces. La phase de retrait de poudre impose des accessibilités outils. Pour prendre en compte cette évolution, il est nécessaire de concevoir spécifiquement les pièces pour la fabrication additive.

Le procédé EBM est au centre du travail réalisé. Il s'agit d'un moyen de fabrication additive en couches, par fusion à l'aide faisceau d'électrons. Les phénomènes thermiques, qui peuvent causer déformations et mauvaise intégrité de la matière, l'opération de dépoudrage et la problématique de la qualité des pièces fabriquées par EBM ont fait l'objet de caractérisations expérimentales. La durée de fabrication et le coût de revient technique des pièces réalisées par EBM ont également été étudiés, afin d'établir des relations entre durée, coût, géométrie des pièces et conditions de fabrication.

Afin de prendre en compte les contraintes explicitées, ainsi que pour bénéficier des importantes libertés que ce procédé offre aux concepteurs, une démarche de conception a été proposée. Cette démarche consiste à générer une ou plusieurs géométries initiales, soit directement par le concepteur, soit par l'utilisation d'outils d'optimisation topologique, à partir de données extraites du cahier des charges. Une fois le balayage de la pièce choisi (en prenant en compte les contraintes de fabrication, le tolérancement de la pièce et la productivité de la fabrication), la pièce est modélisée en incluant un jeu de paramètres pour effectuer une optimisation paramétrique. Cette optimisation permet de dimensionner la pièce, tout en prenant en compte les contraintes de fabrication. A l'issue de cette phase d'optimisation, la géométrie finale est obtenue en prenant en compte les exigences des opérations de parachèvement éventuelles et en définissant les supports, s'ils sont nécessaires. Cette démarche a été illustrée par la reconception de deux pièces mécaniques qui répondent aux exigences de leur cahier des charges fonctionnel, sont fabricables à l'aide du procédé EBM et offrent des gains de masse importants.

Enfin, un chapitre particulier est consacré aux perspectives mises en évidence (et ayant parfois fait l'objet de travaux préliminaires) à l'occasion de ce travail de thèse.

Abstract

Nowadays, the use of Additive Manufacturing processes keeps growing in the industry. Among the numerous kinds of AM processes, metallic Additive Manufacturing processes, and metallic Additive Layer Manufacturing in particular, appear to be the most interesting from a mechanical designer point of view. Several research studies have been conducted on the topic of Design For Additive Manufacturing, mostly discussing the choice of AM processes or presenting the redesign of particular parts. No specific design methodology for ALM processes that takes their specificities into account has been presented.

This PhD thesis shows the changes that ALM processes bring to the design space. The designer now has the opportunity to easily manufacture thin parts, complex parts, lattice structures or mechanisms that don't need any assembly. These processes also have specific manufacturing constraints compared to conventional processes. The heat dissipation is the most important factor since it can cause distortions and porosities. Powder removal, surface and geometrical quality also need to be considered during design. A specific design for additive manufacturing methodology is necessary to take these changes into account.

This work focuses on Electron Beam Melting process. Experiments were conducted and analyzed to assess the manufacturability, regarding the thermal phenomena that take place during melting and cooling, the powder removal and the quality of the parts produced by EBM. The impact of the part geometry on manufacturing duration and manufacturing cost was investigated.

In order to allow designers to use these pieces of information, a designing methodology was suggested and illustrated with two case studies. From the requirements of the parts, one or several parts are generated by the designer himself or by using topological optimization tools. The orientation of the part inside the manufacturing space is then chosen before designing a refined parametric geometry. This parametric geometry is optimized in order to meet the user requirements as well as the process requirements. The last step is the modification of the geometry to comply with the finishing operations (machining allowances for example) and the placement of supports, when needed. This methodology was illustrated with the redesign of two example parts and showed important mass savings from the parts (while meeting user and process requirements).

The prospects discovered and highlighted during this work, some of which were preliminary investigated, are presented in a specific chapter.